CONFÉRENCES-RAPPORTS

de documentation

SUR LA PHYSIQUE

Organisées avec le patronage du Collège de France, du Muséum d'Histoire naturelle, de la Faculté des Sciences de Paris, de la Direction des Recherches et Inventions, de l'Institut d'Optique, de la Société française de Physique, de la Société de Chimie-Physique, de la Société française des Électriciens, de la Société de Navigation aérienne.

Les Conférences-Rapports ont pour but de donner des exposés critiques, détaillés, des travaux modernes sur les questions les plus importantes de la *Physique* et des Sciences connexes : Chimie-Physique, Radioactivité, Astro-Physique, Électrotechnique et leurs applications.

Chaque question fait l'objet de plusieurs conférences et d'un Rapport correspondant. Les conférences sont publiques. Elles sont destinées aux scientifiques, aux techniciens et aux étudiants désireux de se mettre au courant des recherches récentes ainsi qu'à toutes les personnes s'intéressant à la Physique.

Chaque Rapport est publié en un volume contenant l'exposé des conférences, avec des développements supplémentaires et une documentation théorique et expérimentale aussi étendue que possible.

L'ensemble des différents volumes constitue un Recueil vendu par abonnement. Chaque volume est aussi vendu séparément.

L'organisation et la publication des Conférences-Rapports sont placées sous la direction d'un *Comité scientifique* ainsi constitué :

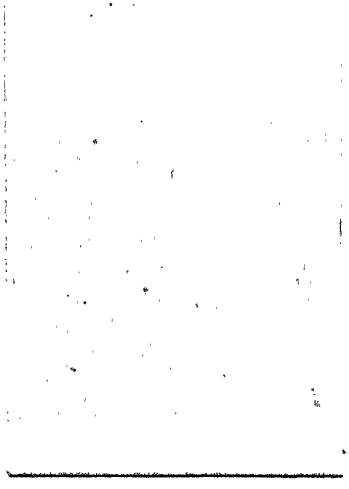
Président : M. Marcel BRILLOUIN, membre de l'Institut, professeur au Collège de France.

Membres : Mme P. CURIE, membre de l'Académie de Médecine, professeur à la Faculté des Sciences de Paris.

MM. ABRAHAM, professeur à la Faculté des Sciences de Paris ; J. BECQUEREL, professeur au Muséum d'Histoire naturelle ; COPAUX, professeur à l'école de Physique et de Chimie ; COTTON, professeur à la Faculté des Sciences de Paris ; DARZENS, professeur à l'École polytechnique ; A. DEBIERNE, chargé de conférences à la Faculté des Sciences de Paris ; MAURICE DE BROGLIE ; DE GRAMONT DE GUICHE ; DUNOYER, secrétaire général de la Société Française de Physique ; FABRY, professeur à la Faculté des Sciences de Paris ; MAURICE LEBLANC fils, secrétaire général de la Société française des Électriciens ; P. LANGEVIN, professeur au Collège de France ; CH. MARIE, secrétaire général de la Société de Chimie-Physique ; MAURAIN, professeur à la Faculté des Sciences de Paris ; J. PERRIN, professeur à la Faculté des Sciences de Paris ; RATEAU, membre de l'Institut.

Pour tous les renseignements sur l'organisation et la rédaction des Conférences-Rapports, s'adresser à M. A. Debierne, Institut du

4578



4578

LA TECHNIQUE DES RAYONS X

Conférences-Rapports de Documentation sur la Physique

PREMIÈRE SÉRIE

ENTIÈREMENT PARUE

Volume	1	**Les Rayons X**, par M. MAURICE DE BROGLIE.....	15 francs
—	2	**La Théorie des Quanta et l'Atome de Bohr**, par M. LÉON BRILLOUIN.....	15 —
—	3	**L'Arc Électrique**, par M. MAURICE LEBLANC fils.....	10 —
—	4	**Les Phénomènes thermioniques**, par M. EUGÈNE BLOCH, maître de Conférences à la Sorbonne.....	10 —
—	5	**La Lampe à trois Électrodes**, par M. C. GUTTON, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy (2e éd.).	20 —
—	6	**La Structure des Cristaux**, par les Rayons X, par M. G. MAUGUIN, professeur à la Sorbonne.....	20 —
—	7	**La Technique du Vide**, par M. L. DUNOYER, maître de Conférences à la Sorbonne.....	15 —
—	8	**L'Évolution des Étoiles**, par M. JEAN BOSLER, directeur de l'Observatoire de Marseille.....	10 —

Souscription à la première série :
80 *francs pour la France et* **90** *francs pour l'Étranger.*

DEUXIÈME SÉRIE

VOLUMES PARUS

Volume	9	*L'Isotopie et les Eléments isotopes*, par Mme PIERRE CURIE, professeur à la Sorbonne.....	22 fr. 50
—	10	*La Technique des Rayons X*, par M. A. DAUVILLIER, docteur ès sciences.....	22 fr. 50

LES VOLUMES A PARAITRE SONT COMPRIS DANS LA LISTE SUIVANTE :

Les Spectres d'absorption et de fluorescence, par M. VICTOR HENRI, professeur à l'Université de Zurich.

Ionisation et Résonance des Gaz et des Vapeurs, par M. LÉON BLOCH, docteur ès-sciences, préparateur à la Sorbonne.

La Dissociation électrolytique, par M. EDMOND BAUER, professeur à la Faculté des Sciences de Strasbourg.

Le Calcul tensoriel et ses Applications, par M. P. LANGEVIN, professeur au Collège de France.

Principes généraux et état actuel de la T. S. F., par M. ABRAHAM, professeur à la Sorbonne.

Concentration des Ions H (pH) Applications, par M. H. MOUTON, maître de Conférences à la Sorbonne.

De la Lumière aux Rayons X, par M. HOLWECK, chef de travaux de physique à la Faculté des Sciences de Paris.

Structure des Spectres, par M. F. CROZE, professeur à la Faculté des Sciences de Nancy.

Abonnement à la 2e série qui comprendra 6 ou 7 volumes
[illegible] 1.000 à 1.200

RECUEIL DES CONFÉRENCES-RAPPORTS
DE DOCUMENTATION
SUR LA PHYSIQUE

Volume 10. *2e Série.*

A. DAUVILLIER
Docteur ès Sciences

PLAN INSTITUTE OF SC
RECEIVED
8 DEC. 1930
LIBRARY

LA TECHNIQUE DES RAYONS X

LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE
49, Boulevard Saint-Michel
PARIS-V^e

1924

·5
NSA

4578

LA TECHNIQUE DES RAYONS X

INTRODUCTION

La technique des rayons X est l'une des plus importantes, mais aussi l'une des plus complexes, de la physique moderne car elle s'occupe de phénomènes qui sont au premier plan de nos préoccupations théoriques actuelles et elle met en œuvre maintes techniques fort diverses, depuis l'art du souffleur de verre jusqu'à l'électrotechnique. Elle est appelée à prendre de jour en jour une plus grande extension, aussi bien scientifique qu'industrielle, comme chapitre important de la technique du tube à vide.

La littérature intéressant ce sujet est devenue considérable depuis une dizaine d'années. Elle est éparse en maints périodiques, tant physiques ou électrotechniques, que médicaux, ainsi que dans une foule de brevets, la plupart publiés en langue étrangère et elle n'a encore fait l'objet d'aucun travail d'ensemble ni de compilation ni de critique. C'est à combler cette lacune que nous nous sommes attaché. Nous espérons que cet ouvrage sera utile aux physiciens qui ont besoin de produire des rayons X adaptés à leurs recherches d'une façon pratique et efficace et qui peuvent actuellement hésiter à faire un choix parmi tant d'appareillages, la plupart disparates ou désuets, dont la description se trouve dans les mémoires originaux. Les techniciens de la radiologie médicale ou industrielle, auxquels nous nous adressons plus spécialement dans la seconde partie de cet ouvrage, y trouveront, outre la description des appareils qu'ils emploient, quelques directives qui, nous l'espérons, leur permettront d'améliorer leur

technique et leurs mesures. Enfin tous ceux qu'intéresse la décharge électrique dans les gaz ou dans le vide y trouveront quelques aperçus théoriques et quelques généralisations que nous avons essayé de dégager des travaux les plus récents et les plus autorisés.

Généralités. — L'émission des rayons X n'est qu'un cas particulier d'une transformation énergétique jouant un rôle essentiel dans l'univers, à savoir l'irradiation de tout ou partie de l'énergie cinétique d'un électron en mouvement sous forme de « quanta » de rayonnement électromagnétique caractérisés par une même vitesse de propagation dans le vide et une périodicité variable. Il en résulte que le domaine spectral des rayons X n'est pas bien défini du côté des basses fréquences (domaine de l'optique), et l'on ne sait trop où finissent les rayons ultra-violets ni où commencent les rayons X. Si l'on considère les rayons caractéristiques, on peut dire que toutes les manifestations spectrales dues aux électrons superficiels des éléments chimiques appartiennent au domaine de l'optique, et que toutes celles qui intéressent la couche électronique sous-jacente sont déjà du domaine des rayons X. Mais si l'on envisage l'excitation des rayons non caractéristiques — du spectre continu de rayons X — la démarcation n'est plus nette car on ignore quel est le mécanisme intra-atomique intime de la transformation. Il faut alors fixer une limite arbitraire au domaine optique et l'on peut choisir celle précédemment définie qui, pour les éléments le plus électropositifs, correspond à environ une dizaine de volts.

Du côté des hautes fréquences, on ne saurait imaginer d'autre limite au spectre continu de rayons X que celle qui nous est pratiquement imposée par les possibilités de l'électrotechnique.

Les rayons X se produisent naturellement par agitation thermique des électrons et l'on peut imaginer que le spectre du rayonnement thermique du « radiateur intégral » se prolonge indéfiniment du côté des hautes fréquences. Ce ne serait cependant que pour des températures extrêmement élevées, encore irréalisables dans nos laboratoires, — même par les procédés d'explosion de fils fins — que cette radiation deviendrait sensible, mais elle joue certainement un très grand rôle dans les phénomènes stellaires (1).

Le seul moyen actuellement connu de production des rayons X consiste à communiquer, au moyen d'un champ électrique, une certaine quantité d'énergie, sous forme cinétique, à des électrons et à arrêter ensuite ceux-ci

(1) Voir à ce sujet les *Conférences-Rapports* de M. J. Bosler, « l'Évolution des Étoiles » appartenant à la 1re série.

dans la matière. Les seuls électrons, naturellement animés d'une grande vitesse, que l'on connaisse — c'est-à-dire les rayons β — ne sauraient servir à cet usage car les sources radioactives sont de trop faible puissance. Leur emploi aurait l'immense avantage de ne nécessiter ni tube à vide ni champ électrique et permettrait la production de radiations de très hautes fréquences qui ne seront excitables qu'avec les plus grandes difficultés par les moyens habituels.

Ce champ électrique intense ne peut être créé que dans le vide. La décharge disruptive dans un diélectrique produit bien des rayons X, connus sous le nom d' « Entladungstrahlen », mais ceux-ci ne peuvent dépasser des longueurs d'onde plus courtes que quelques dizaines d'Angströms par suite du libre parcours très réduit de l'électron dans l'étincelle à la pression atmosphérique. Il en est de même pour les conducteurs très résistants soumis à un champ élevé qui donnent lieu à une émission de rayons de grandes longueurs d'onde (1). Il est donc nécessaire d'opérer dans un gaz assez raréfié pour que le champ puisse être maintenu sans une dépense d'énergie anormale. Une seule électrode isolée, disposée dans une enceinte étanche, suffit donc à constituer un tube à rayons X : c'est la cathode qui sera la source d'électrons et qui sera portée, par rapport à l'enceinte, à un potentiel négatif plus ou moins élevé.

Cette enceinte peut être de nature absolument quelconque pourvu que l'on puisse y entretenir ou y conserver une pression suffisamment basse. Elle est généralement de verre, quelquefois de quartz ou de métal.

La source cathodique d'électrons est l'électrode fondamentale qui caractérise le tube à rayons X. Les rayons cathodiques ont d'abord été produits par l'impact d'ions positifs, comme dans le tube de Crookes. Ils sont aujourd'hui libérés par effet thermique. L'effet photoélectrique ne saurait être utilisé par suite de son faible rendement. On a aussi construit récemment des tubes techniques munis d'une cathode formée d'une électrode pointue disposée dans un vide très élevé. Les électrons sont alors extraits du métal par le champ, à partir d'une certaine valeur critique, par suite de la valeur très élevée de la tension électrostatique à l'extrémité de la pointe. Cette décharge n'est pas accompagnée d'étincelle. Les étincelles employées par Millikan (2) dans son étude du spectre ultra-violet extrême constituent aussi une source intense de rayons X comme Wood (3) l'avait déjà signalé pour de plus hautes pressions. Il s'agit, comme on le sait, de décharges de condensateurs portés à 100 et 200 kilovolts, entre deux

(1) REBOUL, *Journal de Physique*, t. 3, p. 341 (octobre 1922).
(2) *Astrophysical Journal*, t. 52, p. 47 (juillet 1920).
(3) *Phys. Rev.* (juillet 1897).

électrodes très voisines (distantes de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres) disposées dans un vide aussi élevé que possible (10^{-3} barye). Cette nouvelle sorte de potentiels explosifs (1) est susceptible de produire des rayons X de courtes longueurs d'onde car la quantité de matière vaporisée dans le trajet de l'étincelle demeure faible et les électrons peuvent y acquérir des vitesses élevées (2).

Nous allons donc étudier les tubes à rayons X en les caractérisant par leur cathode et nous suivrons pour cela l'ordre historique déjà énuméré. Nous examinerons ensuite les sources de haute tension propres à l'alimentation des tubes, les mesures électriques et du rayonnement, et nous terminerons par l'énumération sommaire des applications actuelles de ces rayons.

(1) D'après HAYDEN, *Journ. Am. Inst. Elec. Eng.*, t. 61, p. 852 (nov. 1922) la rigidité diélectrique du meilleur vide actuellement réalisable est, pour un éclateur à sphères, de 1.235 kv. cm.

(2) Il serait du plus grand intérêt d'analyser au spectrographe le rayonnement X ainsi produit (séries L d'atomes lourds par exemple). On y trouverait probablement plusieurs raies de haute fréquence, têtes de séries, *renversées*.

PREMIÈRE PARTIE

LES TUBES A RAYONS X

CHAPITRE PREMIER

CATHODES A AFFLUX

Le tube à vide (voir fig. 1) avec lequel Röntgen fit en 1895 la découverte des rayons qui portent son nom était un simple tube de Crookes très répandu à cette époque pour l'étude des rayons cathodiques. Il se composait d'une

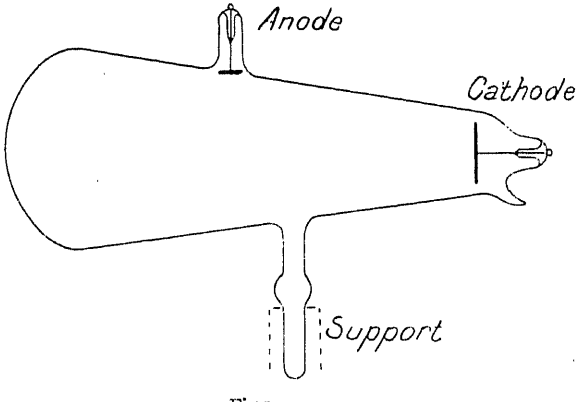


Fig. 1.

ampoule tronconique en verre à base de chaux dit « verre allemand » munie d'une cathode et d'une anode planes en aluminium. Le faisceau cathodique suivait l'axe de l'ampoule et rencontrait la paroi qui devenait la source des nouveaux rayons.

Nous verrons qu'un appareil de ce genre ne pouvait donner naissance à un foyer ponctuel de rayons X : il aurait fallu pour cela que le tube fût cylindrique. Construit en quartz et refroidi par l'huile, il constituerait le plus simple générateur de rayons X doué d'une certaine puissance. Son rendement demeurerait cependant faible par suite du petit nombre atomique du silicium.

L'émission de rayons cathodiques par une électrode disposée dans un gaz raréfié a été découverte par Hittorf en 1868. Ce phénomène a donné lieu à un nombre immense de travaux auxquels sont attachés les noms de Plücker, Goldstein, Hertz, Lénard et Wehnelt en Allemagne, Crookes et J. J. Thomson en Angleterre, Perrin et Villard en France, et dont l'étude sortirait du cadre de cet ouvrage. Nous nous bornerons à en énumérer ici les résultats pratiques.

1. Théorie de l'émission cathodique (1). — La formation des rayons cathodiques dans le tube de Crookes dépend de nombreuses conditions telles que la pression et la nature du gaz, les dimensions, la forme et la nature de l'enceinte et de la cathode.

Villard (2) a particulièrement bien élucidé la question de la formation des rayons cathodiques dans ce cas et a montré que l'émission des corpuscules était un effet secondaire dû au bombardement de la cathode par un courant d'ions positifs, provenant de l'espace obscur de Hittorf. Il a désigné ce courant sous le nom d' « afflux cathodique ». Il est plus généralement connu sous celui de rayons positifs ou canaux.

Considérons donc un tube de Crookes dans lequel la pression est assez basse pour que cet espace obscur remplisse une partie de l'ampoule, la lumière négative entourant seulement l'anode. Cette pression correspond à une dizaine de baryes et à la production de rayons X déjà susceptibles de traverser la paroi de verre. Elle est uniforme *avant* le passage de la décharge. Si l'on porte la cathode à un potentiel négatif élevé, par rapport à l'enveloppe et à l'anode, on pourrait tout d'abord supposer que le petit nombre d'ions toujours présents dans un gaz raréfié ou non sera suffisant pour produire — par ionisation par chocs — assez d'ions positifs pour donner naissance à l'afflux cathodique. Cette ionisation spontanée pourrait être due à la radiation pénétrante.

(1) Nous ne considérerons pas, dans cet exposé, la décharge avec espace sombre de Faraday et lumière positive stratifiée qui correspond à des pressions beaucoup plus élevées.

(2) Les travaux de Villard sur cette question sont résumés dans son ouvrage « les Rayons cathodiques » (*Collection Scientia*, 104 p., 48 fig., Gauthier-Villars, 2e éd., 1908), que nous engageons vivement le lecteur à étudier.

K. T. Compton et T. E. Foulke (1) ont en effet montré que la présence d'une substance radioactive à proximité du tube facilitait la décharge et que l'interposition d'un écran de plomb la prévenait. Cependant, l'introduction d'un tube dans un cylindre métallique suffit à empêcher son fonctionnement par simple action électrostatique. Nous serons plutôt enclins à admettre que le phénomène initial est l'émission par la cathode, et suivant toutes les directions, d'un très petit nombre d'électrons sous la seule influence du champ électrique. Nous retrouverons en effet ce phénomène sous des

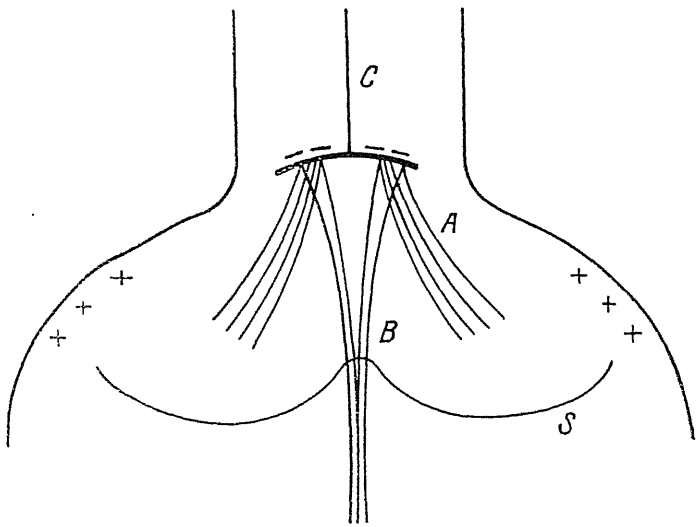


Fig. 2.

pressions excessivement faibles pour lesquelles le gaz résiduel ne saurait jouer aucun rôle et considérablement amplifié par l'emploi de cathodes pointues. L'effet de ces quelques électrons est de produire dans le gaz, par collision, des ions positifs, les corpuscules libérés et accélérés par le champ ajoutant leur action à celle des premiers. Il en résulte la formation d'un faible afflux initial qui produira le faisceau cathodique proprement dit par son impact sur la cathode.

Les ions négatifs ne semblent jouer aucun rôle dans ce phénomène et il est probable qu'aux pressions qui nous occupent les électrons lents libérés lors de l'ionisation d'un atome par un corpuscule rapide n'ont qu'une chance très minime, étant donné leur libre parcours, d'être

(1) *Gen. Electr. Rev.*, t. 26, p. 755 (nov. 1923).

fixés sur une molécule neutre avant d'être accélérés. Nous pouvons donc uniquement parler d'ions positifs et d'électrons.

Le faisceau cathodique ne semble pas non plus, aux basses pressions, jouer un rôle notable dans la production des ions positifs. Son volume est en effet extrêmement restreint par rapport à celui de l'afflux (voir fig. 2). Le gaz situé sur son parcours est certainement très fortement ionisé — et ce phénomène est la cause de la luminescence de son trajet — mais cette ionisation ne joue pas un rôle essentiel dans la décharge. Ce sont, au contraire, les rayons cathodiques diffusés par l'anticathode (ou la paroi) et qui bombardent toute l'ampoule (d'où la fluorescence verte ou bleue de la paroi suivant la nature du verre) qui produisent le plus grand nombre d'ions.

L'amorçage de la décharge ne se fera donc que sous une certaine tension critique pour laquelle des électrons seront spontanément émis par la cathode. Mais, la succession des phénomènes que nous avons envisagés demandant un certain temps pour se produire, la décharge croîtra progressivement en intensité jusqu'à ce qu'un régime stable s'établisse, l'intensité étant limitée par la pression du gaz.

Examinons donc d'un peu plus près ses caractères dans cet état de régime et recherchons tout d'abord la forme probable de l'afflux, du faisceau cathodique et la distribution du champ dans l'ampoule.

Les rayons cathodiques secondaires diffusés par le foyer étant presque aussi rapides que les rayons primaires seront susceptibles de reproduire sur les parois isolantes le phénomène que ceux-ci produisent sur l'anticathode, à savoir une ionisation intense provoquant l'émission d'un nombre d'électrons pouvant dépasser celui des corpuscules incidents. Le résultat en sera une charge positive de toutes les parties isolées de l'ampoule exposées à ce bombardement (1).

La forme des surfaces équipotentielles au voisinage de la cathode C peut donc être représentée en coupe par une ligne en ω telle que S (voir fig. 2). Les trajectoires des ions positifs constituant l'afflux seront alors données par l'application du principe d'Hamilton : elles seront orthogonales à ces surfaces et épouseront la forme des lignes de force. L'afflux A — qui est faiblement visible dans l'espace obscur par suite de l'ionisation qu'il provoque dans le gaz au voisinage de la cathode (2) — présentera

(1) La distribution des charges négatives et positives sur l'ampoule peut se reconnaître comme l'a fait M. Villari en la saupoudrant d'un mélange de soufre et de minium pulvérisés. Le soufre se fixe sur les parties électrisées positivement et le minium sur les régions négatives.

(2) D'après TOWNSEND, *Phil. Mag.*, t. 44, p. 1147 (1922), l'ion H^+ est susceptible d'ioniser la molécule H^2 à partir d'une chute de potentiel de 10 volts.

pect d'une gerbe luminescente creuse dont la surface d'impact sur la ıode sera annulaire et d'où les électrons formant le faisceau catho- ıe principal s'échapperont suivant la normale. Ce faisceau sera donc aussi un cône creux qui deviendra filiforme aux très basses pressions se propageant, suivant l'axe du tube, à travers l'espace obscur et la ière négative.

e résultat de cette accumulation d'ions positifs au voisinage de la ıode sera aussi d'y créer, sur un court espace, une chute de tension sidérable, à tel point qu'elle absorbera la presque totalité de la diffé- ce de potentiel appliquée au tube.

'ar ailleurs, l'émission électronique de la cathode exige une certaine ntité d'énergie correspondant à une limite inférieure imposée à la vitesse ions positifs pour qu'ils soient actifs. La chute de potentiel correspon- te ou chute cathodique minima V_0 est d'autant plus faible que le :al est plus électropositif. Le tableau suivant dû à Mey (1) indique quelques tes cathodiques exprimées en volts dans différents gaz.

TABLEAU I

Gaz	P t	Hg	Ag	Cu	Fe	Zn	Al	Mg	Na	Na-K	K
O^2	369	»	295	280	230	213	190	168	185	169	162
H^2	300	»	»	»	»	»	»	207	178	125	170
N^2	232	226	»	»	»	»	»	»	80	78	69
He	226*	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
A	167	»	»	»	«	»	100	»	»	»	»

Si l'on désigne cette chute par V_0 la distribution du potentiel dans space obscur par rapport à la cathode est donnée par une équation due Shuster (2) dans laquelle k est une constante pour une pression déter- ıée et x la distance à la cathode :

$$V = V_0 (1 - e^{-kx}).$$

Cette relation exprime que la densité des ions positifs dans l'afflux croît progression géométrique à mesure que l'on se rapproche suivant une gression arithmétique de la cathode, fait en accord avec les considé- ions précédentes. Cette chute minima, qui n'est observable qu'aux

1) *Verh. Deut. Phys. Ges*, t. 5, p. 72 (1903).
2) *Proc. Roy. Soc.*, t. 68, p. 526 (1890).

hautes pressions, croît énormément dès que la lumière négative n'entoure plus complètement la cathode, si bien que, dans un tube à rayons X, elle est presque égale à la totalité.de la différence de potentiel appliquée entre les électrodes et elle est localisée au voisinage immédiat de la cathode. D'après Günther-Schulze (1) la chute cathodique est indépendante, jusqu'à 1.000° C., de la température de la cathode. L'intensité du courant et la tension sont alors reliés par une expression linéaire pour chaque valeur de la pression.

Les électrons cathodiques primaires, dont nous avons supposé l'existence pour expliquer l'amorçage de la décharge et qui sont surtout émis par les parties périphériques de la cathode, sont fortement accélérés dans l'espace obscur. Ils y acquièrent immédiatement une vitesse correspondant à la différence de potentiel appliquée au tube. Ils rencontrent et ionisent les molécules du gaz dès qu'ils sont susceptibles de le rencontrer, c'est-à-dire à une distance de la cathode voisine de leur libre parcours à la pression considérée. En deça et au delà de cette distance, leur trajet ne doit donc se révéler par aucune luminosité. C'est là l'origine des espaces sombres de Hittorf et de Faraday qui bornent de part et d'autre la lumière négative. D'après Holm (2) cette dernière est due à la recombinaison des corpuscules lents, produits par ionisation, avec les ions positifs. En fait, lorsqu'on étudie la distribution des charges électriques dans le tube (3) on observe une charge positive décroissante dès qu'on s'éloigne de la cathode, dans l'espace obscur, dénotant un très grand excès d'ions positifs. La lumière négative est électriquement neutre, ce qui correspondrait à la présence simultanée d'un nombre égal de ces ions et d'électrons lents. Dans l'espace sombre de Faraday, il y a enfin un excès d'électrons, par suite de l'appauvrissement de l'afflux. La théorie de Holm n'a cependant pas été vérifiée d'une manière satisfaisante par les travaux de Brose, de Seeliger et Pommering (4) ni par ceux de Holm et Kruger (5) .

Il n'est pas non plus possible d'expliquer le début brusque (ligne S de la figure 2) de la lumière négative vers la cathode par des considérations de probabilité. *Tout se passe comme si le gaz ionisé était « refoulé » par la cathode et comme si la surface de section S délimitait une discontinuité dans la valeur de la pression, celle-ci étant beaucoup plus faible du côté cathodique.* Cette répulsion de l'atmosphère d'ions positifs pourrait être dûe à l'afflux concentré dans l'espace obscur.

(1) *Zeits. für Phys.*, t. 15, p. 8 (mai 1923).
(2) *Phys. Zeits.*, t. 16, p. 28 (1915) et t. 19, p. 555 (1918).
(3) Sir J. J. Thomson : *Conduction of Electricity through Gases.*
(4) *Ann. der Phys.*, t. 59, p. 589 (1919).
(5) *Phys. Zeits.*, t. 20, p. 11 (janv. 1919).

Il est d'ailleurs à remarquer que la pression doit être fort éloignée de l'uniformité durant le passage de la décharge. Un calcul simple montre que toutes les molécules présentes dans le tube rencontrent plusieurs fois la cathode (sous forme d'ions positifs) dans l'unité de temps. Ce courant gazeux de grande densité est contrebalancé par le courant inverse de molécules neutres (et de quelques ions négatifs) issu de la cathode. L'épaisseur de l'espace obscur est proportionnelle au libre parcours λ de l'électron cathodique dans le gaz. Il est inversement proportionnel à la pression et peut même servir à évaluer celle-ci. Il dépend naturellement, à égalité de pression, de la nature du gaz. Il est, par exemple, beaucoup plus grand dans l'hydrogène que dans l'air. Si le libre parcours l d'une molécule d'hydrogène à 0°, et sous la pression de 10 baryes, est de 1,5 cm., celui d'un corpuscule serait d'après J. J. Thomson, $4\sqrt{2}$ fois plus grand (1), soit 8 cm., et l'espace obscur doit remplir à cette pression la plus grande partie du volume de l'ampoule.

La présence du gaz a aussi pour effet d'accroître considérablement l'intensité du courant électronique initial. Nous verrons ultérieurement que la densité d'un pur courant d'électrons dans un vide parfait, entre électrodes parallèles, planes et indéfinies, est donnée par l'équation de Langmuir :

$$i = \frac{\sqrt{2}}{9\pi}\sqrt{\frac{e}{m}}\frac{V^{3/2}}{d^2} = 2{,}33 \cdot 10^{-6}\frac{V^{3/2}}{d^2}\ \frac{\text{amp.}}{\text{cm}^2}$$

dans laquelle $\frac{e}{m}$ représente le rapport de la charge de l'électron à sa masse, V la différence de potentiel en volts et d la distance des électrodes. En présence d'un gaz cette densité devient (2), en supposant des collisions inélastiques entre corpuscules et molécules :

$$i = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}}\left(\frac{10}{9}\right)^{3/2}\sqrt{\frac{e}{m}}\sqrt{\frac{\lambda}{d}}\frac{V^{3/2}}{d^2} = 5{,}45 \cdot 10^{-6}\sqrt{\frac{\lambda}{d}}\cdot\frac{V^{3/2}}{d^2}$$

en ampères par centimètre carré. Si la masse moléculaire du gaz est M, les électrons vont $4\sqrt{3{,}67\,M}$ fois plus vite que les ions et chaque ion neutralise la charge spatiale de $242\sqrt{M}$, soit environ mille, électrons.

Il semble que la radiation ultra-violette issue de la lumière négative ait une influence stabilisatrice sur la décharge en alimentant, par effet photo-électrique, l'émission cathodique initiale dont nous avons supposé

(1) Le facteur 4 s'introduit par suite de la dimension négligeable de l'électron vis-à-vis de celle de l'ion et le facteur $\sqrt{2}$ est dû à sa bien plus grande vitesse.

(2) K. T. COMPTON, *Phys. Rev.*, t. 21, p. 266 (mars 1923).

l'existence. Lorsque les ampoules sont dépourvues d'anode — laquelle est généralement constituée par une simple tige d'aluminium logée dans une tubulure disposée loin de la cathode — elles sont en effet moins stables aux faibles pressions. Ceci est peut-être dû au fait que la lumière négative ne peut subsister autour de l'anticathode, trop rapprochée de la cathode et généralement engainée dans une tubulure de verre dont nous dirons plus loin le rôle.

La couleur de la lumière négative dépend de la nature du gaz : elle est bleue dans l'azote, jaune dans l'oxygène et rose dans l'hydrogène, lumière correspondant à l'excitation de la série de Balmer de cet élément.

Dans un travail récent, J. J. Thomson [1] a émis l'hypothèse que l'ionisation dans l'espace obscur et la lumière négative, de même que l'émission corpusculaire de la cathode, étaient dûes à l'effet photoélectrique de la radiation produite par la neutralisation de l'afflux positif à la cathode. Il semble cependant difficilement admissible que cette radiation soit susceptible de provoquer l'émission d'un courant photoélectrique de l'ordre de dizaines de milliampères et l'on sait que la théorie photoélectrique de l'émission thermo-électronique n'est pas défendable.

Il est à remarquer que les électrons émis par la *surface utile* de la cathode sous l'influence des rayons Röntgen excités dans le tube devraient, tout au moins théoriquement, allonger indéfiniment et asymptotiquement, du côté des hautes fréquences, la courbe spectrale de ce rayonnement. En effet, si l'on applique au tube la différence de potentiel V les électrons cathodiques auront en arrivant au foyer la vitesse : $v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$ avec les notations usuelles. Si l'élément constituant la cathode est de nombre atomique assez faible pour que le travail d'extraction de ses électrons K soit petit devant le quantum « effectif » du rayonnement Röntgen absorbé, les corpuscules qu'il émettra auront une vitesse peu inférieure à v, le maximum spectral étant voisin de la « limite » de haute fréquence. Ces corpuscules acquerront encore dans le champ la vitesse v si bien qu'ils arriveront sur l'anticathode avec une vitesse voisine de $2v$. Ces phénomènes se reproduiront indéfiniment de proche en proche, mais ils sont si faibles qu'ils échappent à l'observation et qu'ils ne sauraient donner lieu à aucune application pratique.

Des expériences récentes de Ratner [2], sur la nature de la décharge électrique dans les gaz raréfiés, semblent cependant infirmer ces consi-

(1) *Phil. Mag.*, t. 48, p. 1-33, (juillet 1924).
(2) *Phil. Mag.*, t. 40, p. 785 (déc. 1920).

dérations théoriques : Une anode incandescente — construite comme l'est une cathode de Wehnelt — était disposée en face d'une cathode en aluminium du type ordinaire. Les différences de potentiel étaient fournies, jusqu'à 2.000 volts par des accumulateurs et jusqu'à 20 kV. max. par une bobine. Deux expériences, effectuées, l'une dans un vide élevé (pression d'une barye), l'autre, sous une pression beaucoup plus grande, montrèrent que la décharge s'amorçait brusquement, que l'anode soit allumée ou éteinte, c'est-à-dire que la cathode soit bombardée ou non par un courant d'ions positifs dont l'intensité était de 10^{-6} ampère. De plus, une anode auxiliaire portée à un potentiel supérieur de 200 volts à celui de l'anode incandescente, de manière à capter les électrons émis, accusa un courant proportionnel à la pression, ce qui prouverait l'origine gazeuse du faisceau cathodique.

Ces expériences ne paraissent pourtant pas très démonstratives car il semble douteux qu'un afflux artificiel aussi faible que celui mis en œuvre puisse jouer un rôle comparable à celui de l'afflux naturel dont l'intensité doit être cent ou mille fois plus grande.

Une expérience très remarquable de P. Villard (*Les Rayons cathodiques*, p. 93) montre que les électrodes ne servent, dans un tube à rayons X, qu'à distribuer les potentiels et à entretenir la circulation du gaz sous forme d'afflux. Nous savions déjà que l'anode peut être disposée en un endroit quelconque de l'ampoule et que son but est uniquement de fixer le potentiel de l'atmosphère conductrice intérieure. Or il en est de même pour la cathode : Villard scinde cette électrode en deux parties, l'une, centrale et en forme de disque, est isolée par une longue tige de cristal. L'autre, annulaire, entoure la première et est portée, comme l'est une cathode usuelle, à un potentiel négatif élevé. Cette disposition ne modifie en rien le fonctionnement du tube et l'on observe encore la formation d'un filet cathodique axial, partant du centre de l'électrode centrale isolée qui peut même être remplacée par un petit disque de verre ou de quartz. L'électrode négative annulaire ne sert donc qu'à créer le champ.

La charge positive qu'elle tendrait à acquérir doit être neutralisée par une décharge invisible entre les deux parties de la cathode, mais cette expérience montre bien que les rayons positifs, tout comme les électrons rapides, sont capables de provoquer une abondante émission électronique lorsqu'ils bombardent des conducteurs ou des isolants. Ces phénomènes semblent jouer un rôle très important dans le fonctionnement des tubes à vide contenant des gaz résiduels.

L'expérience de Villard montre que l'on pourrait — d'une manière qui semble d'abord paradoxale — constituer les deux électrodes actives d'un

tube à rayons X, l'anticathode et la cathode, par des pièces « isolantes », de quartz par exemple, à condition de disposer les électrodes métalliques des deux signes d'une manière convenable pour assurer la distribution voulue des potentiels dans l'ampoule. On sait d'ailleurs qu'il a été utilisé en radiologie (1) peu de temps après la découverte de Röntgen, des tubes à vide dont les électrodes étaient externes et constituées par des capsules d'eau (pour le refroidissement) dans lesquelles baignaient les extrémités de l'ampoule. Celle-ci était alimentée sous une pression de l'ordre de mille baryes par des courants de haute fréquence.

2. Discontinuité de l'émission cathodique. — Villard a montré en produisant — au moyen d'un champ magnétique tournant — la rotation d'un faisceau cathodique alimenté par un condensateur que, si l'on recevait ce faisceau sur un écran fluorescent, sa trace apparaissait discontinue et qu'il était émis à raison de 2.500 à 5.000 éruptions par seconde.

Ce phénomène a été interprété mathématiquement par Perkins (2) qui a considéré le tube comme formé par l'association d'une capacité (créée par la chute cathodique) et d'une résistance disposées en parallèle. Si une tension constante est appliquée au système le calcul montre qu'il doit se produire des variations périodiques dans l'intensité du courant, dont la fréquence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée et la capacité plus petite.

Le phénomène est analogue à celui de l'arc autochantant observé par Blondel, une capacité additionnelle remplaçant celle de l'arc qui ne présente pas de chute cathodique (3).

Cette discontinuité de l'émission cathodique entraîne celle du rayonnement Röntgen. Il est par conséquent nécessaire pour certains usages exigeant une émission continue et invariable dans le temps de ces rayons (comme pour la réalisation de certains effets cinématographiques), d'utiliser un tube à cathode incandescente, qui est dénué de cette particularité, alimenté sous une tension constante.

3. Nature de la cathode. — Revenons à la production du faisceau cathodique principal par le bombardement de l'afflux. L'émission d'un ou plusieurs électrons par le métal cathodique, sous l'influence de l'impact d'un ion doué d'une grande énergie cinétique, peut être expliquée par une élé-

(1) IMBERT et BERTIN-SANS, *C. R.*, t. 122, p. 605 (1896).

(2) *C. R.*, p. 1389 (mai 1909).

(3) Voir dans cette série de *Conférences-Rapports* la monographie de M. M. LEBLANC fils: « l'Arc électrique ».

vation locale considérable de la température au point d'impact (émission thermo-électronique). La surface bombardée par l'afflux semble en effet recouverte par une multitude de petits points brillants et fugaces qui évoquent la comparaison avec le spinthariscope. Kapitza (1) a montré par le calcul que cette hypothèse rendait assez bien compte de l'émission des rayons δ par impact de rayons α sur un solide matériel. Les électrons doivent posséder une direction d'émission privilégiée normale à la trajectoire de la particule ionisante. La surface s'échauffe aussi fortement, à tel point que si elle est constituée par un métal volatil (éléments alcalins ou alcalino-terreux) elle devient luminescente (rose avec Al, verte avec Mg) et montre le spectre caractéristique de l'élément constituant. Nous devons donc nous attendre à des différences considérables dans la manière de se comporter des cathodes suivant leur nature et nous pouvons prévoir que la production d'un faisceau cathodique d'intensité donnée exigera une dépense d'énergie à la cathode d'autant moindre que le métal sera plus électropositif. L'expérience confirme cette manière de voir. Dunoyer (2) a observé que le dépôt, sur une cathode d'acier de gouttelettes microscopiques d'un métal alcalin, donnait lieu à l'émission de faisceaux cathodiques très déliés à partir de chacune d'elles, R. v. Hirsh et F. Soddy (3) ont montré qu'une cathode en aluminium très pur fonctionnait avec difficulté et rendait le tube instable, tandis qu'une électrode renfermant une trace de sodium (comme c'est parfois le cas pour l'aluminium commercial,) fonctionnait très régulièrement. Ils pensent que le sodium décompose la vapeur d'eau issue du verre en se chargeant d'hydrogène, ce qui diminue le travail électronique de sortie. Coolidge (4) a fait aussi à cet égard des expériences suggestives. Il a remplacé dans un tube à gaz la cathode d'aluminium habituelle par une de tungstène et a observé qu'il devenait alors extrêmement difficile d'entretenir la décharge. L'anticathode était de même forme, de même nature et symétriquement disposée dans le tube par rapport à la cathode. On observait, pendant le fonctionnement, que les deux électrodes étaient portées à une vive et égale incandescence. La quantité d'énergie nécessaire pour extraire les corpuscules cathodiques était donc aussi grande que celle dépensée à l'anticathode. Une cathode d'aluminium identique demeurait au contraire à une température peu élevée, car elle peut émettre quatre ou cinq électrons lents par

(1) *Phil. Mag.*, t. 14, p. 989 (mai 1923).
(2) *C. R.*, t. 150, p. 970 (1910) et *Le Radium*, t. 7, p. 300 (1910).
(3) *Phil. Mag.*, t. 14., p. 779 (déc. 1907).
(4) *Phys. Rev.*, t. 2, p 409-430 (1913).

mpact d'un ion rapide. D'après Willey (1) la puissance dépensée dans une cathode de ce type n'excède pas, dans un tube ordinaire, 20 % de la puissance totale consommée dans l'ampoule. Nous retrouverons plus loin (voy. page 131) par une voie très différente une estimation identique. Hahn (2) a étudié électrométriquement l'émission électronique qui se produit sur chacune des faces d'une feuille d'or battu lorsqu'elle est traversée par des rayons positifs H^+ d'énergie atteignant 30 kV. Il a observé que l'émission à la sortie croissait extrêmement vite en fonction de la vitesse des rayons positifs et que l'or pulvérisé par ceux-ci était chargé positivement. L'émission corpusculaire atteint la même valeur sur les deux faces dès que les rayons H^+ ont une énergie de 25 kV. Chaque ion libère alors une dizaine d'électrons. Un bien plus grand nombre sont probablement émis dans l'épaisseur du métal, mais ces corpuscules ont une si faible vitesse qu'ils ne sont pas capables d'en sortir. Leur vitesse croît avec l'énergie des rayons positifs. Le quart des électrons émis ont une énergie maxima de 1,25 volt lorsque les ions en ont une de 6 kV. et de 10 volts pour 22 kV.

Il convient donc d'utiliser, pour construire la cathode, un élément aussi électropositif que possible. Le meilleur semblerait être le glucinium qui allie, à un travail de sortie moindre que celui de l'aluminium, un point de fusion élevé (1.200° C).

4. Évaporation cathodique. — Une autre considération doit guider dans le choix du métal cathodique : c'est de prévenir autant que possible la désintégration ou évaporation électrique (sputtering) de cette électrode. La percussion mécanique de l'afflux a pour effet d'arracher de la surface des particules matérielles qui, chargées négativement, se propagent en ligne droite et se déposent sur les parois de l'ampoule. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'énergie cinétique des ions est plus considérable, par conséquent que la pression est plus basse (chute cathodique plus grande) et que le gaz est plus lourd. Les gaz lourds mono-atomiques A, Hg, et les grosses molécules organiques sont très funestes aux cathodes. Lorsqu'un tube doit demeurer longtemps scellé sur une pompe et que l'appareil renferme en quelque endroit une petite quantité de mercure, il est indispensable de prévenir l'entrée de la vapeur de cet élément (1 barye à 15° C) dans l'ampoule. Le meilleur moyen consiste à intercaler un condenseur plongé dans la neige carbonique, la tension de vapeur du mercure à — 78° C étant de 4.10^{-6} barye, c'est-à-dire pratiquement nulle. Ce procédé

(1) *Arch. Röntg. Rays*, t. 12, p. 250 (1908).
(2) *Zeits. für Phys.*, t. 14, p. 355 (avril 1923).

est beaucoup plus efficace que les méthodes chimiques (feuilles d'or, sélénium, vapeurs de zinc) qui sont, ou efficaces pendant trop peu de temps, ou d'un emploi incommode.

La désintégration cathodique dépend aussi beaucoup de la nature de la cathode. Crookes (1) a étudié, à ce point de vue, différents éléments dans les mêmes conditions d'excitation (air : $p = 50$ baryes, bobine d'induction).

Les pertes de poids observées, rapportées au palladium, furent :

TABLEAU II

Pd	100	Cu	37
Au	92	Cd	31
Ag	76	Ni	10
Pb	69	Ir	10
Sn	52	Fe	5
Zn + Cu	47	Al	0
Pt	40	Mg	0

(*Le tungstène se pulvérise très fortement et le tantale* (2) *très peu*).

Granquist (3) a montré que cet ordre dépend de la pression du gaz. La figure 3 indique la perte de poids, en milligrammes par heure, en fonction de la pression, éprouvée par des feuilles métalliques minces (0,06 mm. d'épaisseur) et de 0,57 cm² de surface, pour un courant de 2,5 milliampères. On voit que la désintégration tend à devenir considérabe aux pressions des tubes à rayons X. Ces chiffres sont utiles pour la pratique, ce phénomène étant très fréquemment utilisé pour obtenir, sur des lames de verre ou de quartz, des dépôts métalliques, conducteurs et transparents, ou pour construire des résistances élevées que l'on conserve en scellant le tube à vide et que l'on peut diminuer ultérieurement. Ces dépôts ont la propriété de se modifier avec le temps peu après leur formation, leur texture devenant moins fine et il convient de les laisser « vieillir ».

Crookes a montré qu'un alliage d'or et d'aluminium employé comme cathode ne pulvérisait que l'or. La désintégration est donc un phénomène atomique, mais sa loi de variation en fonction du nombre atomique demeure inconnue. Cette remarque est corroborée par un travail de Kahler (4) qui a étudié, par la méthode d'analyse cristalline de Debye-Hull, les dépôts

(1) *Proc. Roy. Soc.*, t. 1 (1891), p. 88.
(2) GARDINER : *Journ. Rintg. Soc.*, t. 5, p. 66 (mai 1909).
(3) *Oefv. Kgl. Ventensk. Akad. Forh. Stockholm* (1898), p. 709.
(4) *Phys. Rev.*, t. 18, p. 210 (1921).

obtenus par évaporation thermique et cathodique de plusieurs éléments. Il a trouvé que les premiers semblaient amorphes et qu'ils étaient formés par la juxtaposition de particules métalliques importantes tandis que les seconds étaient cristallisés et semblaient constitués par l'apport d'atomes isolés.

La pulvérisation pourrait donc, dans certains cas, permettre des séparations d'éléments, car c'est un gros phénomène. Pour séparer ceux du

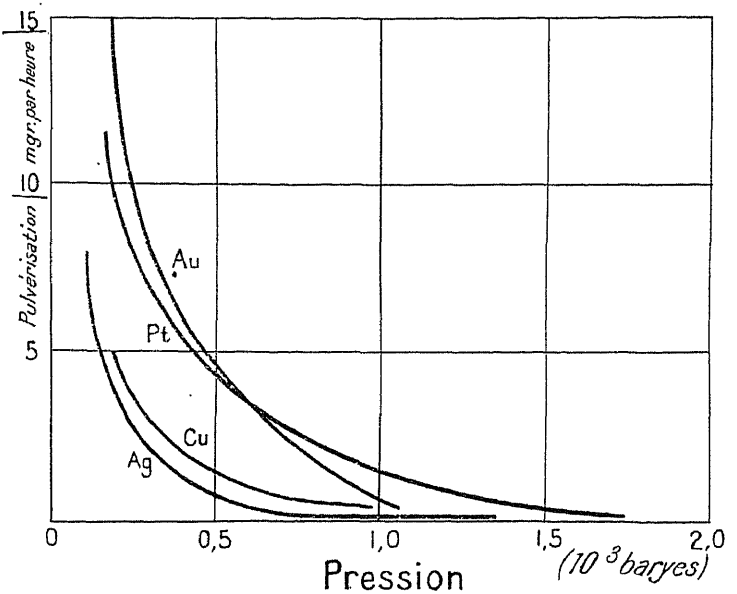


Fig. 3

groupe des terres rares, on pourrait par exemple utiliser comme cathode l'alliage métallique complexe que l'on obtiendrait en électrolysant le mélange des chlorures bruts fondus. On pulvériserait cette électrode en présence de vapeur de mercure et l'on soumettrait le jet matériel, convenablement délimité par des diaphragmes, à un champ magnétique intense. On sait, en effet, que la susceptibilité magnétique varie rapidement dans ce groupe en passant par deux maxima. Le spectre magnétique obtenu sur un écran contiendrait les divers éléments dans un état de séparation probablement avancé.

L'évaporation cathodique croît aussi avec la température de la cathode mais elle est toujours considérablement plus élevée que l'évaporation thermique. Elle est aussi proportionnelle à l'intensité du courant et à la chute cathodique, et est à rapprocher de l'émission d'hydrogène qui devient le

phénomène prépondérant pour de plus hautes pressions. Il est très important de la prévenir par l'emploi d'éléments électropositifs et de gaz légers, car le dépôt métallique miroitant qu'elle produit sur les parois a un pouvoir d'absorption considérable pour les gaz, si bien que les tubes métallisés deviennent instables et sont rapidement mis hors d'usage. Le dépôt conducteur modifie aussi la distribution des potentiels dans le tube qui devient alors très résistant, même sous de fortes pressions (voir page 26).

5. Refroidissement de la cathode. — La plus grande partie de l'énergie cinétique de l'afflux cathodique (et nous avons vu que, même avec une cathode

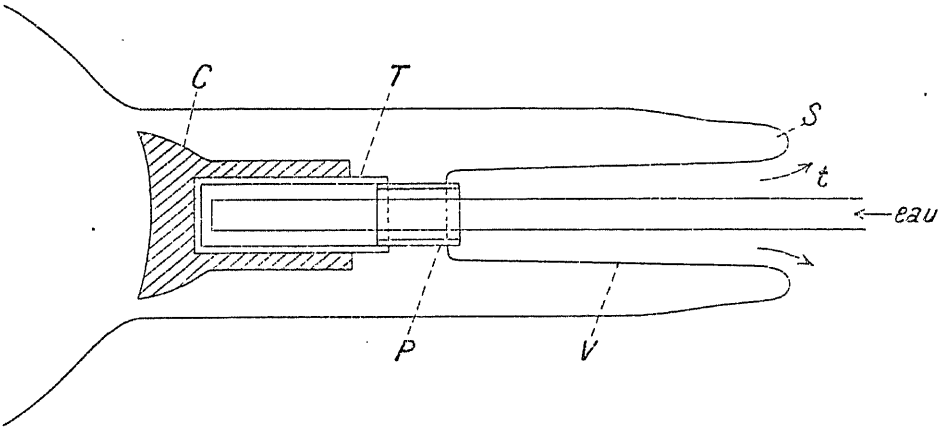


Fig. 4.

d'aluminium, elle pouvait atteindre 20 % de la puissance consommée dans l'ampoule) est dépensée en chaleur à la cathode. Cette énergie est proportionnelle à l'intensité du courant, — c'est-à-dire au nombre des ions, — et à la chute cathodique, si bien que, lorsque la cathode n'est pas refroidie artificiellement, elle peut fondre, soit avec une grosse intensité permanente du courant (une vingtaine de milliampères sous une trentaine de kilovolts), soit par l'emploi d'une haute tension (quelques milliampères sous 200 kv.).

Lorsqu'un tube doit fonctionner dans ces conditions, il devient nécessaire de refroidir la cathode, soit par un courant d'air ou d'eau, soit par ébullition de ce liquide. La figure 4 schématise le dispositif adopté. La pièce massive en aluminium C est emboîtée ou vissée sur un tube de cuivre étanche T raccordé au tube de verre V par un collet de platine P. Celui-ci est soudé de part et d'autre au cuivre et au verre, et le tube V est finalement réuni à la tubulure cathodique de l'ampoule par la soudure annulaire S. Un petit tube *t* sert à l'introduction du fluide réfrigérant.

6. Forme de la cathode. — La forme de la cathode, importante aux grandes pressions, est à peu près indifférente pour les fortes chutes cathodiques. Nous ne parlons ici, bien entendu, que de la face antérieure bombardée par l'afflux.

Lorsque le champ est faible, et que l'afflux recouvre la plus grande partie de la face active, les rayons cathodiques sont émis normalement à la surface et les lignes équipotentielles sont parallèles à la section droite de l'électrode (voir fig. 2).

Une cathode concave donne un cône creux de rayons cathodiques avec un foyer punctiforme au centre de courbure, au delà duquel les rayons divergent ensuite. Une cathode plane fournit un faisceau cathodique ayant la forme d'un tube cylindrique droit. Une cathode convexe produit un faisceau tronconique divergent. Ces différences s'atténuent lorsque l'afflux se resserre. La cathode concave donne alors un faisceau qui devient punctiforme avant le centre de courbure et demeure ensuite filiforme. Aux très basses pressions des tubes à rayons X, la surface d'impact de l'afflux devient elle-même punctiforme et les trois sortes de cathode donnent le même faisceau très délié.

Il en résulte que le point focal disparaît et que l'anticathode peut être disposée en un endroit à peu près quelconque sur le trajet des rayons cathodiques. Si elle présente une face plane normale à l'axe du tube, le foyer de rayons X a la forme d'un petit anneau circulaire. Il est elliptique dans le cas habituel d'une surface anticathodique inclinée. Le diamètre de cet anneau diminue lorsque la pression décroît et son épaisseur augmente avec l'intensité du courant.

Les sources secondaires (1) de rayons X qui prennent naissance dans un tube de ce genre sont peu importantes. La paroi frappée par les rayons cathodiques diffusés par le foyer n'émet que faiblement par suite des petits nombres atomiques de ses éléments constituants. Le reste de la surface anticathodique, bombardée par des rayons tertiaires diffusés par l'hémisphère antérieur, émet très peu de rayonnement, d'autant moins que cette électrode est en général engainée dans un tube de verre. Les rayons X dus à la fluorescence et à la dispersion (2) sont négligeables, si bien que ces tubes sont excellents au point de vue de la définition qu'ils permettent d'obtenir en radio-diagnostic.

Nous verrons que les besoins de la spectrographie exigent parfois un foyer

(1) A. LUMIÈRE, *Journ. Rad. et Electr.* (déc. 1918).

(2) Ces sources sont étudiées par la méthode de la chambre photographique à trou (voy. p. 56). L'auteur a ainsi examiné des cathodes d'aluminium, au travers d'une fenêtre transparente, pour rechercher si la surface d'impact de l'afflux (H +) ne jouait pas le rôle d'une source primaire de rayons X avec ce résultat que l'émission, jusqu'à 200 KV *max*, était nulle.

linéaire de rayons X. On peut obtenir ce résultat, comme E. Wiedemann (1) l'a montré, en faisant usage d'une électrode présentant la forme d'un angle dièdre.

Tous ces effets peuvent se prévoir ou s'interpréter facilement par l'étude de la forme des surfaces équipotentielles au voisinage de la cathode et en traçant les lignes de force orthogonales. Il faut pour cela non seulement tenir compte de la forme de la face active de la cathode mais encore de celle de l'ampoule dans la région où se produit l'afflux.

Le diamètre du tube exerce, lorsque celui-ci est cylindrique, une influence très importante sur la concentration de l'afflux et par suite sur la grandeur de la chute cathodique. Pour une même pression gazeuse, le tube sera d'autant plus résistant qu'il aura un plus faible diamètre (2) et que les électrodes seront plus rapprochées.

C'est aussi l'ampoule qui centre, suivant son axe, l'afflux cathodique et, si la cathode est excentrée, ce sera seulement sa région axiale qui émettra des rayons cathodiques.

7. Cathodes à chute de potentiel réglable. — Ces remarques montrent qu'il est possible de modifier électriquement ou géométriquement la chute cathodique à *pression constante*, c'est-à-dire d'obtenir à volonté un tube « mou » ou « dur » suivant les expressions consacrées par l'usage.

Un procédé électrique décrit par Villard consiste à disposer, en face de la cathode, un anneau métallique isolé pouvant être porté, par un dispositif potentiométrique analogue à celui de la figure 74, à un potentiel positif réglable. On peut ainsi réduire considérablement la section de l'afflux et augmenter d'autant la résistance du tube.

On arrive au même résultat, comme Campbell-Swinton l'a montré, en enfilant sur la cathode un tube de verre ou de métal, de section légèrement supérieure, qu'on laisse déborder plus ou moins du côté actif de l'électrode. Une meilleure solution consiste à monter la cathode sur une tige filetée de manière à pouvoir la faire avancer ou reculer (par rotation magnétique par exemple) dans la tubulure cathodique (voir fig. 5). L'ampoule étant chargée positivement jusqu'à la naissance de cette tubulure, l'afflux est d'autant plus resserré que la cathode y est plus profondément enfoncée. Wehnelt (3) a observé que ce dispositif permettait de faire varier l'étincelle

(1) *Wied. Ann.*, t. 63, p. 248 (1897) ; *Eclairage électrique*, t. 16, p. 84 ; *Journal de Physique*, t. 7, p. 358.

(2) Winkelmann a décrit des expériences dans lesquelles il put obtenir des rayons X susceptibles de traverser la paroi de verre avec un tube de 1 cm. de diamètre et sous une pression d'hydrogène aussi élevée que 30 mm. de mercure. Si cependant le tube est rendu trop étroit, cet effet de concentration disparaît.

(3) *Verh. d. Deut. Phys Ges.*, p. 259 (juillet 1903).

équivalente, à égalité de pression, dans la proportion de 1 à 8. Lorsque la cathode doit être fixe, il faut avoir soin de lui choisir une position moyenne compatible avec la tension maxima à laquelle on fera fonctionner le tube et une pression convenable. C'est pour cette raison que les cathodes sont toujours légèrement enfoncées dans les tubulures cathodiques. Si on les faisait déborder à l'intérieur du ballon, le tube apparaîtrait très mou et se désamorcerait subitement pour une pression encore élevée.

Ces phénomènes expliquent l'importance que présente la métallisation de l'ampoule, particulièrement au voisinage de la tubulure cathodique, pour la bonne marche du tube. Le dépôt métallique augmente la conductibilité

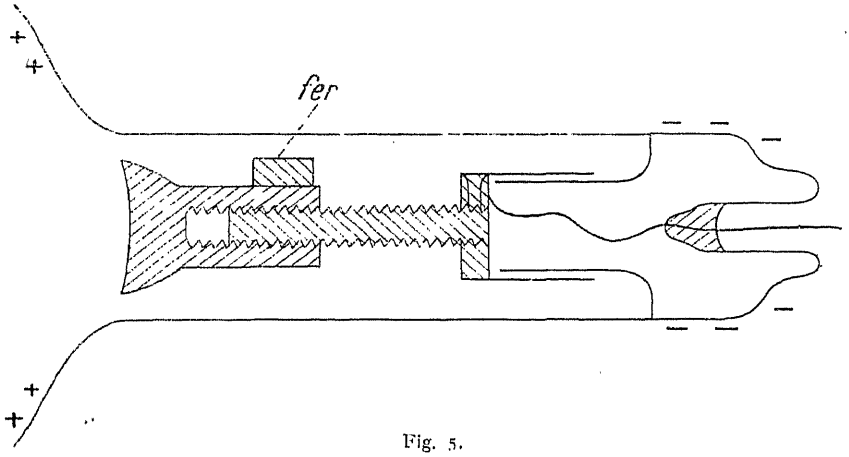


Fig. 5.

de la paroi, et par suite son potentiel positif, à tel point que la formation de l'afflux peut être prévenue. Les tubes dépourvus d'anode et munis d'un osmo-régulateur peuvent cependant être encore utilisés dans cet état en prenant l'osmo comme anode. Broca a montré qu'en entourant le col cathodique métallisé, d'une feuille conductrice prise comme cathode, et en faisant passer une faible décharge à travers le verre, on pouvait vaporiser le dépôt et rendre au tube sa stabilité primitive.

8. Absorption des gaz pendant la décharge. — Il est bien connu que la pression du gaz résiduel, dans un tube à rayons X en activité, s'abaisse rapidement : on dit que le tube « durcit » et, si l'on ne parvenait, par l'un des procédés que nous décrirons plus loin, à y introduire de nouvelles quantités de gaz, la pression s'y abaisserait tellement que l'afflux ne pourrait plus s'y maintenir et que l'ampoule s'éteindrait.

Cette absorption se produit encore, quoique plus lentement, avec un

tube dépourvu d'électrodes. Elle serait donc surtout due à la paroi. Villows (1) a montré que l'on pouvait ranger — par ordre de pouvoir absorbant croissant — le verre d'Iéna, le cristal et le verre sodique et que ce dernier absorbait à peu près également l'hydrogène, l'air et l'azote. Cependant, un chauffage ultérieur du verre ne libérait qu'une faible partie du gaz disparu et une argenture de la paroi intérieure n'avait qu'un effet très faible. Gouy (2) a montré, par des expériences reprises par Campbell-Swinton (3), que, si l'on chauffait la paroi d'un tube de Crookes après le passage d'une décharge prolongée, il y apparaissait un grand nombre de bulles gazeuses microscopiques. Il interprétait ce résultat en imaginant que les molécules étaient projetées dans la paroi par le choc des rayons cathodiques diffusés par l'anticathode.

Soddy et Mackenzie (4) ont cependant montré que le verre de tubes ayant fonctionné avec de l'hydrogène, de l'hélium et du néon, et qui présentait nettement ce phénomène, ne libérait aucune trace de ces gaz lorsqu'il était fondu dans le vide à des températures atteignant 1.300° C. Ces auteurs mettent donc en doute les conclusions de Gouy et de Campbell-Swinton et pensent que les bulles sont dues à une décomposition chimique du verre (de carbonates et de sulfates) sous l'influence de l'élévation locale de température causée par le bombardement corpusculaire. La porcelaine elle-même, chauffée dans le vide vers 1.000° C, émet en effet une grande quantité d'hydrogène et de gaz carbonique.

Les tubes construits en quartz donnent également lieu au même phénomène de disparition du gaz. Il se pourrait que les ions électropositifs contenus dans la paroi soient neutralisés par les rayons cathodiques diffusés en donnant naissance à des éléments actifs, comme les métaux alcalins et alcalino-terreux ou le silicium à l'état atomique, et qu'il s'agisse simplement de combinaisons chimiques stables entre le gaz et ces éléments.

En ce qui concerne l'absorption des gaz rares on ne peut cependant imaginer de pareilles combinaisons, mais il est à remarquer que l'hydrogène et l'hélium donnent des ions positifs particulièrement rapides qui pénètrent sans doute assez profondément — par exemple : jusqu'à 0,01 mm. — dans la cathode, pour ne plus ensuite pouvoir en sortir. Soddy (*loc. cit.*) a en effet montré que les gaz rares monoatomiques étaient fortement absorbés et retenus par les électrodes d'aluminium. (Les cathodes formées de métaux alcalins fixent au contraire chimiquement tous les autres gaz, excepté ceux-là.)

(1) *Phil. Mag.* (1901).
(2) *C. R.*, t. 122, p. 775 (1896).
(3) *Roy. Soc. Proc.*, t. 79, p. 134 (1907).
(4) *Journal Röntg. Soc.*, t. 4, p. 46 (1908).

Le durcissement prend enfin des proportions considérables lorsque la cathode se pulvérise, mais le gaz est alors mécaniquement fixé sur les parois et adsorbé par le film déposé.

9. Régulateurs de pression. — Cette diminution de pression exige l'adjonction aux tubes à rayons X de dispositifs permettant de rétablir la pression nécessaire au fonctionnement. Avec les premiers tubes de Crookes on se contentait de chauffer la paroi de verre pour provoquer le dégagement des gaz occlus. Crookes introduisit plus tard un fragment de potasse caustique dans un tube latéral, dont le chauffage donnait lieu à un dégagement de vapeur d'eau, d'ailleurs réabsorbée au refroidissement. On a aussi employé pour cet usage des substances telles que le charbon de bois, le mica, qui sont connus pour leur grand pouvoir d'adsorption à froid. L'oxyde d'argent donne par chauffage à 200° C de l'oxygène pur non réabsorbable.

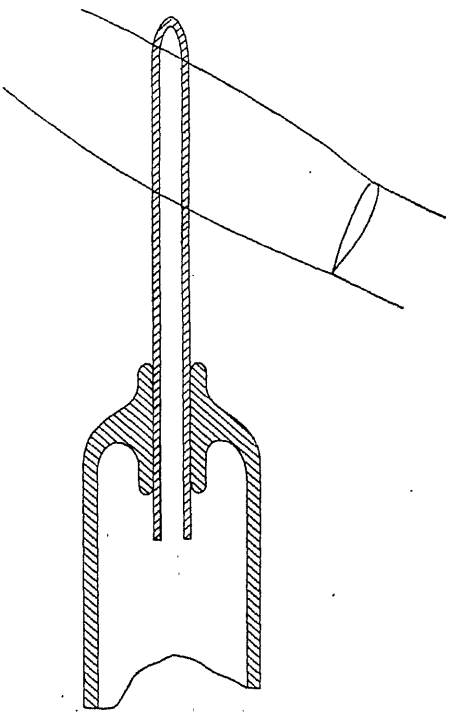


Fig. 6.

Osmo-régulateur. — Le premier régulateur pratique est dû à Villard (1) qui imagina un dispositif extrêmement simple et ingénieux, connu sous le nom d'osmo-régulateur. C'est une application des expériences de Sainte-Claire Deville sur la diffusion de l'hydrogène dans le fer ou le platine incandescents. Il se compose (voir fig. 6) d'un petit tube de platine ou mieux de palladium d'environ 60 mm. de long, de 1 à 2 mm. de diamètre, d'une épaisseur de l'ordre du dixième de millimètre, fermé à un bout par fusion au chalumeau et soudé à son autre extrémité dans un tube de verre porté par l'ampoule. Il suffit d'en chauffer au rouge l'extrémité libre dans une flamme pour que l'hydrogène de celle-ci (dissociation de la vapeur d'eau) pénètre — par suite de la grande différence des pressions — à travers le métal. Un courant de gaz *froid*, rencontrant l'osmo légèrement chauffé, le porte même rapidement au rouge, par suite du dégagement de chaleur causé par la formation de Pd^2H. Aucun autre gaz ne présente cet effet et l'on peut ainsi introduire rapidement dans l'ampoule de l'hydrogène pur et sec. Il est même possible d'obtenir — quoique très lentement — le passage inverse, par conséquent de durcir le tube, en évitant l'atmosphère d'hydrogène autour du platine incandescent. On y parvient en chauffant l' « osmo » pendant plusieurs heures au travers d'un tube protecteur. Le mécanisme de ce phénomène a été particulièrement bien mis en évidence par Keehan (2) qui a étudié, par la méthode de Hull, la structure cristalline du palladium pur et de son hydrure Pd^2H. Il a trouvé, dans les deux cas, des réseaux cubiques à faces centrées, d'arêtes respectivement égales à 3,9 et 4,03 Angströms. La masse spécifique de Pd^2H serait ainsi de 10,76 gr/cm³. La combinaison ne s'effectue qu'à partir d'hydrogène *atomique*.

Un très grand nombre de brevets ont été pris pour rendre automatique le chauffage de l'osmo ou l'introduction de l'hydrogène, afin d'obtenir dans le tube une pression aussi constante que possible. On a, par exemple, imaginé des dispositifs commandés, soit par le passage du courant à travers l'ampoule, soit par celui d'une étincelle jaillissant en dérivation sur le tube, pour modifier, directement ou par des relais appropriés, la grandeur d'une flamme de gaz brûlant habituellement en veilleuse.

On a proposé d'en porter l'extrémité à l'incandescence dans le gaz d'éclairage ou l'hydrogène en l'utilisant comme anticathode (3), ou comme électrode d'éclateur, et d'y faire pénétrer l'hydrogène en l'entourant d'une solution aqueuse hydracide ou basique dont on effectuait l'électrolyse en le prenant comme cathode dans un circuit isolé (4).

(1) *C. R.*, t. 126, p. 1413 (1898).
(2) *Phys. Rev.*, t. 21, p. 335 (mars 1923).
(3) C. REGAUD, *Brevet français*, n° 440.500 (févr. 1912).
(4) H. PILON, *Brevet français*, n° 451.129 (févr. 1913).

1578

Le tube Snook à hydrogène possède deux osmos, l'un à l'air libre, l'autre enfermé dans une ampoule scellée contenant de l'hydrogène à la pression atmosphérique, faisant tous deux partie de circuits d'étincelle. Le premier permet d'abaisser la pression, le second de l'augmenter.

Il est prudent de ne faire fonctionner les osmo-régulateurs, surtout ceux de palladium qui sont très sensibles, que pendant le fonctionnement du tube, sans quoi on s'expose à le mollir beaucoup trop et à le mettre hors d'usage. La même recommandation s'applique d'ailleurs à la plupart des régulateurs.

Valves à mercure. — Moore a imaginé un régulateur automatique qui

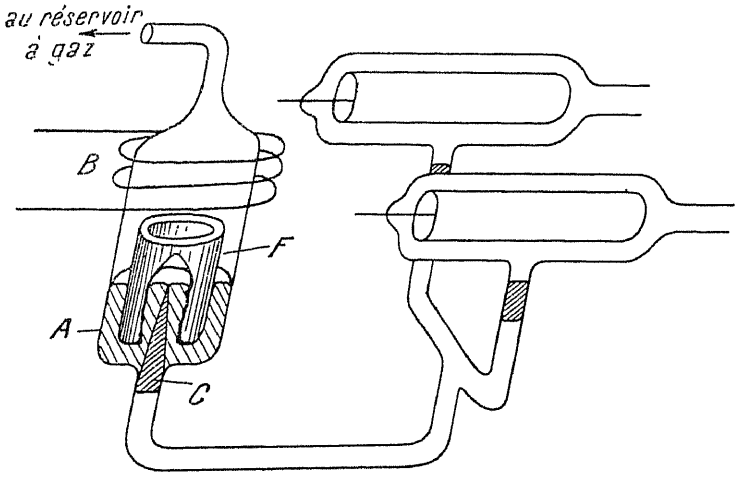


Fig. 7.

sert à assurer une pression constante dans ses tubes d'éclairage et qui est construit de la manière suivante :

Une ampoule de verre A (voir fig. 7), soudée d'une part au tube et de l'autre au réservoir à gaz, est obturée, à sa partie inférieure, par un cône C en charbon de bois poreux ordinairement noyé dans un bain de mercure. Un flotteur en fer F est susceptible d'être allégé par l'attraction d'une bobine B entourant la partie supérieure de l'ampoule et disposée de manière à être parcourue par un courant croissant lorsque celui traversant le tube diminue. Le cylindre est alors soulevé et le niveau du mercure baisse en laissant émerger la pointe du cône poreux. Le tube mollit alors et le cylindre retombe.

H. Bauer (1) a construit sur ce principe un régulateur adapté aux tubes

(1) *Journ. Röntg. Soc.* (1907).

à rayons X. Il se compose (voir fig. 8) d'un long tube capillaire T terminé d'une part par une petite chambre de compression C pleine d'air et débouchant de l'autre à la pression atmosphérique. Le capillaire est rempli de mercure jusqu'au niveau *n* ; il porte, un peu au-dessous de ce point, un petit tube *t* obturé par un bouchon de porcelaine poreuse. Le joint de mercure est déplacé en exerçant en P. une pression au moyen d'une pompe

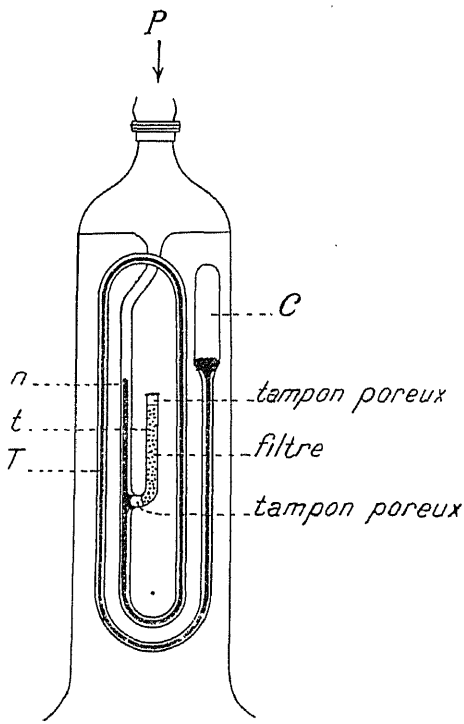


Fig. 8.

à main. Lorsque la pression cesse, l'air comprimé en C refoule le mercure dans sa position initiale.

Ce régulateur a l'inconvénient d'être peu transportable, car la colonne de mercure se fragmente alors fréquemment. Roch (1) l'a perfectionné en plaçant le bouchon poreux à l'extrémité d'un tube de verre débouchant au centre d'une petite ampoule sphérique remplie aux deux tiers de mercure. Un autre tube latéral, scellé dans le petit ballon et également obturé, débouche juste en face de la matière poreuse et permet d'insuffler une bulle d'air ou d'un gaz quelconque.

(1) *Journ. Rad. et Elect.*, t. 2, p. 178 (mai 1916).

Régulateurs à étincelles. — Un système de régulation automatique très employé consiste à disposer dans un tube latéral soudé à l'ampoule, soit entre deux électrodes en forme de petits pistons, soit simplement au contact d'une électrode unique, de l'amiante ou du mica imprégnés d'une substance pulvérulente libérant facilement des gaz par chauffage, comme certains oxydes de manganèse par exemple. L'électrode est prolongée par une longue tige métallique avançant du côté de la borne cathodique du tube. Lorsqu'un autre pôle est employé, il est relié à l'anode. Si l'intensité du courant diminue dans le tube, la tension s'accroît, le générateur étant habituellement commandé par une résistance réglable en série. Il jaillit alors une étincelle et la décharge traverse la substance qui dégage une petite quantité de gaz.

Mutscheller (1) a décrit un tube à azote muni d'un régulateur à étincelles dans lequel la substance régénératrice était un mélange de nitrures (Th. Ba, Al) ayant la propriété de réabsorber à froid le gaz dégagé. La pression pouvait ainsi être automatiquement réglée.

Un régulateur d'une commande électrique à distance facile a été imaginé autrefois par Rodde. Il se compose d'un petit fil de platine soudé dans un tube de verre porté par l'ampoule et recouvert d'une substance dégageant aisément des gaz. Ce fil est chauffé, lorsqu'on veut mollir le tube, par une batterie de 4 volts, isolée à la manière des batteries de cathode des tubes Coolidge.

Régulateurs automatiques. — Tous ces procédés agissent d'une manière intermittente et exigent pour fonctionner une variation de régime souvent importante, ils sont donc bien imparfaits.

Lorsqu'un tube doit fonctionner sur une pompe de « vitesse » invariable, un procédé élégant consiste à utiliser les lois d'écoulement des gaz raréfiés dans les tubes capillaires. On soude à l'ampoule une série de tubes communiquant librement avec l'atmosphère — ou avec un réservoir de gaz quelconque — de diamètre et de longueurs différentes, munis chacun d'un robinet. L'ouverture d'un tube permet d'obtenir un régime dynamique de pression rigoureusement constant.

L. Dunoyer (2) proposait ainsi de faire pratiquement fonctionner les tubes de Crookes en les montant directement sur la pompe moléculaire de Gaëde et de modifier leur dureté par ce procédé. La sujétion du vide, de l'étanchéité des joints et de leur refroidissement rend cependant cette technique peu pratique en dehors du laboratoire.

La véritable solution du problème a été donnée par F.-A. Linde-

(1) *Arch. Electr. Méd.*, t. 28, p. 325 (1920).
(2) *Les gaz ultra raréfiés*, Conférence de 1912.

mann (1). D'après cette invention on maintient un corps placé dans l'ampoule et présentant un phénomène de dissociation réversible, à une température constante, déterminée par la pression que l'on désire conserver. Si l'on considère, par exemple, les équilibres :

$$CO^3\,Ca \rightleftarrows CO^2 + Ca\,O$$
$$2\,Ba\,O^2 \rightleftarrows O^2 + 2\,Ba\,O$$

à chaque température de la phase solide correspond une tension de dissociation invariable. Si la décharge tend à abaisser la pression, la décomposition s'effectue de manière à rétablir la tension d'équilibre. Si, au contraire, il y a dégagement par les électrodes ou les parois, d'une petite quantité du même gaz, la réaction de recombinaison absorbe ce gaz. On peut faire varier dans des limites très étendues la pression d'équilibre en modifiant la température et la maintenir constante aussi longtemps qu'on le désire.

Cette régulation s'effectue en disposant le corps solide dans un petit tube latéral soudé à l'ampoule, à l'intérieur d'un enroulement de constantan ou de nichrome parcouru par un courant de chauffage fourni par un circuit isolé — comme dans le dispositif de Rodde. Un gramme de carbonate de calcium peut donner naissance à un dégagement de 250 cm^3 de CO^2. C'est dire qu'un tel régulateur a une durée pratiquement illimitée. Cette invention aurait eu la plus grande importance pratique si elle n'avait coïncidé avec celle du tube Coolidge que nous étudierons ultérieurement.

10. Choix du gaz. — Il n'est pas indifférent d'introduire un gaz quelconque dans un tube à rayons X. Nous avons déjà vu qu'il convenait d'éviter les gaz rares monoatomiques au point de vue de l'évaporation cathodique. Soddy et Mackenzie (*loc. cit*) ont montré que ces gaz donnaient des chutes cathodiques considérables pour des pressions élevées. Un tube à rayons X rempli d'hélium présentait une étincelle équivalente de 2,2 cm. (16 kv.) pour une pression de 150 baryes et la décharge cessait brusquement pour une pression encore élevée, alors que le même tube rempli d'hydrogène présentait la même résistance pour la pression moitié moindre de 80 baryes.

Un autre tube, évacué à la manière ordinaire, au moyen d'une pompe à mercure, et soigneusement étuvé, présentait une étincelle de 9 cm. entre pointes, pour une pression, mesurée à la jauge de Mac-Leod, de 5 baryes, alors qu'évacué complètement au moyen du four à calcium et rempli d'hydrogène pur, cette résistance correspondait à une pression de 12 baryes. Il est probable que, dans le premier cas, le gaz résiduel se composait surtout d'anhydride carbonique dégagé pendant l'étuvage. Il est donc

(1) *Brevet français*, n° 465.503 (1913).

avantageux d'utiliser l'hydrogène lorsqu'on veut faire fonctionner un tube sous une tension élevée. Des tubes à atmosphère d'hélium ou d'argon sont cependant utilisés pour le radio-diagnostic.

Siegbahn (1) indique comme il suit les pressions en baryes de différents gaz correspondant à diverses duretés :

TABLEAU III

DURETÉ	GAZ					
	H^2	He	O^2	air	CO^2	A
Faible :	21	38	7	12	7	12
Moyenne :	11	22	5	6	5	7
Grande :	7	11	4	4	4	4

L'auteur a expérimenté, il y a quelques années, un tube dans lequel la cathode était constituée par un bain de mercure. L'ampoule et l'anticathode étaient purgées des gaz occlus par étuvage et ébullition du mercure. La tension de vapeur de ce métal était réglée en maintenant l'étuve à une température constante. On pouvait espérer obtenir ainsi une pression aisément réglable, tout en évitant le durcissement et la pulvérisation. Le point d'impact de l'afflux était brillant et mobile comme il l'est dans une lampe à vapeur de mercure et la dépression qu'il causait sur la surface avait pour effet d'infléchir irrégulièrement le faisceau cathodique en rendant son centrage sur l'anticathode impossible. Le fonctionnement était en outre fort instable, la pression ayant tendance à croître rapidement avec l'intensité du courant en amenant la disparition de la chute cathodique. Le mercure condensé sur les parois absorbait aussi les rayons produits, si bien que le dispositif n'apparut satisfaisant en aucune manière.

Il est à remarquer qu'un tel tube doit émettre des rayons X aussi bien à la cathode qu'à l'anticathode. Lorsque les ions Hg^{++} rapides rencontrent la cathode, tout se passe comme si *une anticathode matérielle de mercure animée d'une grande vitesse, venait au devant des électrons au repos* dont est chargée la cathode. Le rayonnement émis doit présenter aussi bien un spectre continu que les raies du mercure. Des ions H^+ rapides devraient au contraire exciter seulement les rayons caractéristiques du mercure dont est constituée la cathode.

V. Bush et Smith (2) ont montré que l'absorption du gaz par la cathode pouvait être prévenue en constituant celle-ci d'un charbon de porosité convenable ou par un bain d'étain maintenu à l'état de fusion par l'afflux.

(1) *Spektroskopie der Röntgenstrahlen* ; 1 v. 257 p., 119 fig. (J. Springer, 1924).
(2) *Journ. Am. Inst. Electr. Eng.*, t. 61, p. 627 (sept. 1922).

Ces auteurs ont construit sur ce principe de petites soupapes cathodiques destinées à fonctionner sous des tensions de l'ordre du kilovolt.

11. Construction des tubes. — Nous avons supposé jusqu'ici que nous avions affaire au tube original de Crookes sans anticathode car l'introduction de ce perfectionnement ne modifie en rien les caractères de l'appareil. Crookes avait déjà construit, dix ans avant la découverte de Röntgen, un tube dit « focus » parce qu'il était muni d'une cathode sphérique concave épousant la courbure du ballon et qu'il portait en son centre une lame isolée de platine iridié.

Crookes montrait ainsi les effets calorifiques des rayons cathodiques en portant l'obstacle à l'incandescence. Il avait donc réalisé un tube à rayons X moderne dont la disposition fut reprise en 1896 par Campbell-Swinton qui inclina l'« anticathode » à 45° sur le trajet des rayons cathodiques, afin de rendre le foyer plus apparent, et en fit une électrode permettant la suppression de l'anode.

Ces tubes n'ont subi depuis que des modifications de détail qui ont augmenté leur puissance. Les anticathodes incandescentes de platine iridié — comme celle du tube Chabaud-Villard — ne supportaient guère plus d'une quarantaine de watts et étaient souvent fondues et perforées par l'effet percutant du faisceau cathodique. Elles furent remplacées (1) par des électrodes constituées par des disques de platine ou des boutons d'osmium, d'iridium, de tantale, puis de tungstène, soudés ou enchâssés dans un épais tube de cuivre refroidi par l'ébullition de l'eau contenue dans un réservoir dont l'anticathode formait le fond, par circulation d'air ou d'eau, ou enfin par un radiateur extérieur. La construction est la même que pour la cathode de la figure 4. Le collet de platine intermédiaire est soudé, d'une part, directement au verre (le coefficient de dilatation du platine : $8{,}7\ 10^{-6}$ est très voisin de celui des verres alcalins : 9.10^{-6}) et, d'autre part, à l'argent sur le tube de cuivre. On peut aussi remplacer le platine par un acier au nickel cuivré de même dilatation (à 45 % de fer), par un cône de fer comme dans le tube Macalaster Wiggin, ou un ferro-chrôme (20 % Cr) se soudant directement au verre, comme dans le tube métallique Philips (voy. page 66).

Lorsque le tube doit demeurer en communication permanente avec une pompe, l'anticathode peut être montée sur une tubulure portée par l'ampoule à la manière d'un bouchon rodé, soudé ou mastiqué. La figure 9

(1) WALTER, *Forts. a. d. Geb. d. Röntg.*, t. 2 (août 1899) ; BUGUET et CHABAUD, *C. R.*, t. 129, p. 591 (1899). Johnson et Matthey ont aussi construit en 1899 un tube à quatre cathodes, dont l'anticathode creuse pyramidale était supportée par des tubes de platine amenant une circulation d'eau.

représente le tube construit sur ce principe par Rausch von Traubenberg.

La soudure directe du cuivre au verre, soit sous forme de disques, soit sous celle de tubes, a été réalisée industriellement (1) par Housekeeper de la Western Electric Cº. Elle consiste à obtenir une pénétration intime du verre et du métal par action chimique ou trempage en ayant soin

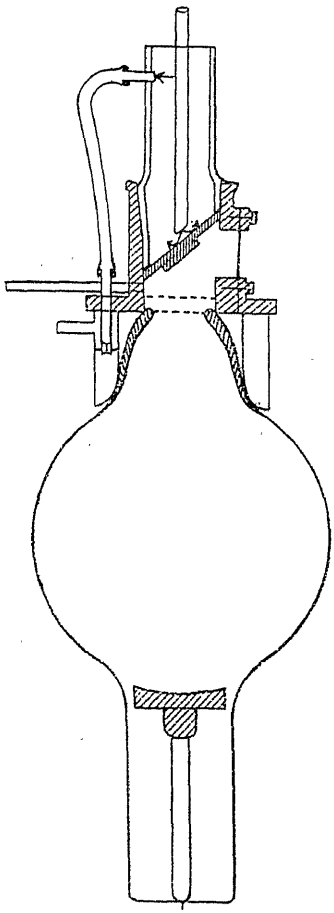


Fig. 9.

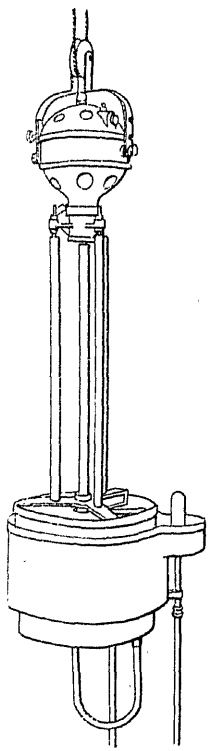


Fig. 10.

d'amincir en lame de couteau les bords ou les extrémités de la pièce métallique. Des joints de toutes dimensions construits suivant cette technique peuvent subir des variations de température répétées de plusieurs centaines de degrés, au-dessous et au-dessus de zéro, en demeurant rigou-

(1) W. WILSON, *Electr. Commun.*, t. 1, p. 15 (août 1922).

reusement étanches. Ils ont déjà été utilisés pour la construction de pliotrons de grande puissance.

Lorsqu'une électrode isolée doit être refroidie par une circulation d'eau, il est commode d'utiliser une pompe refroidissante isolée du genre de celle de la figure 10 (Koch et Sterzel). Celle-ci se compose d'un moteur électrique entraînant par l'intermédiaire d'un arbre isolant, une pompe de

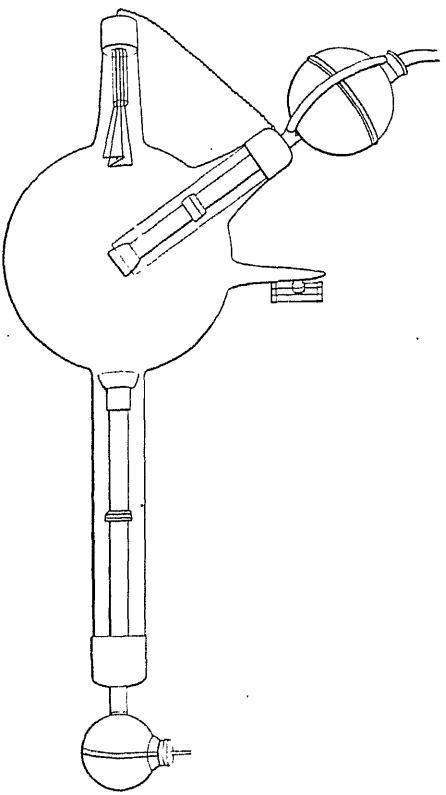


Fig. 11.

circulation d'eau et un ventilateur qui, par le courant d'air ascendant qu'il produit dans un réfrigérant tubulaire, refroidit l'eau venant de l'ampoule. Ce modèle évacue un kilowatt d'une manière indéfinie. Pour de plus fortes puissances il faut utiliser les organes du refroidissement d'un moteur d'automobile. Ceux de la « Ford » évacuent 7 kilowatts et cette puissance pourrait certainement être augmentée par l'emploi d'un radiateur perfectionné tels que ceux utilisés dans l'aéronautique.

Il convient d'entourer les anticathodes refroidies d'un manchon de verre

comme cela est visible sur la figure 11. Ce dispositif a pour but de réduire la production de rayons cathodiques (et l'évaporation conséquente) par cette électrode lorsque le tube est soumis à une force électromotrice inverse. Il serait aussi, sans cette gaine, beaucoup moins résistant dans ce sens que dans le sens direct. L'inversion n'en a pas moins des conséquences fâcheuses pour l'existence de l'ampoule : elle produit, normalement au plan actif de l'anticathode, un faisceau cathodique filiforme qui frappe la paroi de verre au dessous de la cathode et la fond.

Il est donc préférable que la face active de l'anticathode soit normale au faisceau cathodique direct de manière à renvoyer sur la cathode le faisceau inverse, d'autant plus que la dispersion des rayons cathodiques primaires est alors réduite au minimum.

Les anticathodes, dissipant par rayonnement thermique l'énergie du faisceau cathodique, ne sont pas convenables pour les tubes à afflux, car le métal absorbe en se refroidissant une grande quantité de gaz, dégagés à nouveau lors d'un fonctionnement ultérieur. Cet inconvénient est particulièrement marqué lorsqu'on introduit dans ces tubes l'anticathode massive de tungstène du tube Coolidge standard.

Le refroidissement par l'eau bouillante est au contraire très convenable car, à la température de 100° C, une anticathode de cuivre n'a tendance ni à absorber, ni à dégager d'importantes quantités de gaz. F. A. Lindemann (1) a proposé de remplacer l'eau par le mercure.

La plupart des tubes évacués et scellés sont construits en verre alcalin fusible aussi transparent que l'aluminium pour les rayons X. Par suite de la distribution des potentiels dans l'ampoule, la presque totalité de la différence de potentiel appliquée au tube se retrouve entre la borne cathodique et la naissance de cette tubulure. Il faut donc allonger d'autant plus celle-ci que le tube doit fonctionner à une tension plus élevée. Le tube Müller autodurcissant à eau bouillante (tube S. H. S.) (voir fig. 11), qui est destiné à la thérapie profonde et qui fonctionne sous des tensions de crête atteignant 200 kV. (40 cm. d'étincelle entre pointes), a ainsi une tubulure cathodique de 40 cm. de longueur. La cathode d'aluminium et l'anticathode de platine sont refroidies par ébullition d'eau. C'est un tube à hydrogène muni d'un osmo commandé par un régulateur actionné par le courant traversant l'ampoule (régulateur de Wintz). Il supporte 2,5 milliampères moyens sous la tension indiquée. Il est construit pour durcir extrêmement vite. On remarque qu'il possède une anode filiforme constituée par un filament métallique réfractaire utilisable comme cathode incan-

(1) *Brevet français*, nº 475.688 (juin 1915).

descente durant le pompage et pouvant permettre le dépôt d'un film absorbant sur les parois. C'est un tube remarquable, très répandu en Allemagne. On n'a pas encore réussi à construire des tubes de ce modèle pour de plus hautes tensions.

Wintz (1) a, dans un but de protection électrique, relié au sol une électrode auxiliaire disposée dans la région médiane du ballon. Celui-ci est ainsi rendu électriquement neutre mais l'électrode auxiliaire doit se comporter comme cathode et il est nécessaire de diriger le faisceau cathodique produit sur l'anticathode, par exemple. Ce mode de neutralisation est plus commodément applicable aux tubes à pure émission électronique.

L'isolement extérieur de la tubulure cathodique peut aussi être amélioré en l'entourant d'un manchon isolant rempli d'huile jusqu'à la naissance du ballon. L'auteur a ainsi réussi à faire fonctionner un petit tube Chabaud-Villard sous une tension constante atteignant 110 kV. L'immersion totale dans l'huile trouble la répartition des charges sur le ballon et empêche un fonctionnement stable. Il en est de même de l'introduction de l'ampoule dans une enceinte conductrice trop exiguë.

Pour améliorer les conditions isolantes de la surface des tubes construits en verre, Szilard (2) a proposé de les vernir à la gomme laque. Ce procédé est particulièrement utile pour les tubes à cathode incandescente immergés dans l'huile.

La puissance de ces tubes est surtout limitée, même avec de gros ballons (on en a construit de 10 litres de capacité), par l'échauffement du verre de l'hémisphère antérieur dû au bombardement causé par les rayons cathodiques diffusés par l'anticathode. Le cinquième, en effet, des corpuscules constituant le faisceau cathodique sont réémis dans toutes les directions par le foyer avec des vitesses peu inférieures à celle des électrons primaires. C'est ce bombardement qui cause la vive fluorescence verte des verres alcalins et la fluorescence bleue du cristal ou du quartz. Si l'on dépense 200 watts au foyer, la paroi de verre *absorbe* donc presque 40 watts, et elle est portée à une température assez élevée pour donner lieu à des phénomènes d'électrolyse endommageant rapidement l'ampoule. L. Dunoyer (3) a effectivement montré que la conductibilité du verre croissait extrêmement vite au voisinage de 200° C. Cette conductibilité dépend aussi, comme V. Bush et Connell (4) l'ont montré, de la quantité de vapeur d'eau retenue par les parois. La résistance peut varier, dans la proportion

(1). *Münch. Med. Woch.*, t. 49, p. 1719 (1916).
(2) *Brevet français*, n° 461.240 (août 1913).
(3) *C. R.*, t. 149, p. 1120 (déc. 1909).
(4) *Journ. Franklin Inst.*, t. 164, p. 231, août 1922.

de 1 à 6 par traitement du verre dans le vide. Le quartz présente un effet analogue. Certains tubes américains actuels sont munis de cupules protectrices en fer entourant la cathode voir fig. 12) qui réduisent l'échauffement du verre au col cathodique. Des anticathodes encapuchonnées du genre de celle de la figure 21, empêchant la dispersion des rayons cathodiques diffusés, seraient probablement d'une grande efficacité.

On a cherché à réaliser, dans le but d'accroître la protection, des tubes pouvant être scellés, en employant des ballons de cristal, opaques aux rayons X, munis d'une fenêtre, rapportée et soudée, en verre sodique transparent. H. Bauer a construit des tubes de ce genre.

Il était également intéressant de munir les tubes en verre sodique d'une

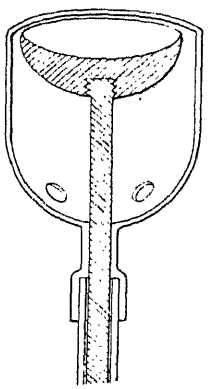


Fig. 12.

fenêtre particulièrement transparente. Or, les feuilles minces d'aluminium ou de mica ne peuvent être scellées que par des masticages et le tube ne pourrait pas être évacué d'une manière durable.

C. L. et F. A. Lindemann (1) ont très élégamment résolu le problème. Ils remplacent le silicate double de sodium et de calcium (Na, 11 ; Si, 14 ; Ca, 20) par du borate de lithium $Li^2\ B^4\ O^7$ (B, 5 ; Li, 3) auquel ils ajoutent un peu de glucine Gl O (Gl, 4) et un excès d'anhydride borique $B^2\ O^3$ pour éviter la cristallisation. La formule indiquée est :

$Li^2\ B^4\ O^7$.	83,5 %
$B^2\ O^3$.	14 %
Gl O.	2,5 %

Ce verre se souffle aisément et se soude bien aux verres sodiques, mais il est hygroscopique et il convient de le vernir. Alors qu'une paroi de verre

(1) *Brevet français*, n° 389.205 (1908).

sodique de 0,5 à 1 mm. d'épaisseur devient sensiblement opaque pour des longueurs d'onde voisines de 1,2 Angström, le verre Lindemann ne l'est — pour la même épaisseur — que vers 2,5 Angström. Il est également assez transparent dans l'ultra-violet. Il n'est pas fluorescent.

Il est enfin possible, lorsque le tube doit fonctionner sur une pompe à grand débit, de supprimer toute fenêtre matérielle afin de pouvoir faire sortir de l'ampoule des rayons Röntgen ou cathodiques très absorbables.

Le tube de Lénard qui était muni d'une fenêtre d'aluminium de 0,00026 cm. d'épaisseur, ne permettait pas le passage dans l'air de rayons, cathodiques lents. Pauli (1) a réussi à construire un tube dans lequel la fenêtre est supprimée et remplacée par un système de trous. Un simple orifice, de très petit diamètre, pratiqué dans la paroi d'un tube à vide, ne permettrait pas d'y abaisser la pression au-dessous de 1 mm. de mercure environ. Pauli a tourné la difficulté en disposant, sur le parcours des rayons une série de compartiments qui se partagent la différence des pressions. Avec un seul étage évacué, ainsi que le tube lui-même, par des pompes rotatives à mercure Gaede et en employant des orifices de 0,01 mm. de diamètre, la pression atteint dans le compartiment 0,8 mm. et elle est assez basse dans le tube pour que l'on puisse y produire des rayons X. Avec deux compartiments intermédiaires, disposés entre le tube et l'atmosphère, il est possible d'utiliser trois ouvertures cent fois plus grandes, à savoir de 0,1 mm. de diamètre. Enfin l'emploi de pompes plus rapides permettrait encore d'augmenter l'efficacité du dispositif.

Pauli a étudié la sortie dans l'air de rayons Röngten très absorbables, de rayons cathodiques et de rayons positifs en variant la polarité des électrodes. Les seconds produisaient des phénomènes de phosphorescence très marqués sur un écran de sulfure de zinc. Des effets analogues furent difficilement observables avec les rayons positifs à une distance du trou excédant 0,8 mm. avec une étincelle équivalente de 3 cm.

On a construit quelques tubes en quartz fondu et cette matière s'est révélée extrêmement appropriée à cet usage. Les conducteurs d'amenée du courant sont alors des fils de tungstène, mais les coefficients de dilatation de ces deux substances si petits soient-ils (2) ne sont pas rigoureusement

(1) *Phys. Zeitsch.*, t. 21, p. 11 (janvier 1920).

(2) Le coefficient de dilatation du tungstène a les valeurs suivantes : WORTHING, *Phys. Rev.*, t. 10, p. 638 (1917).

$4{,}4.10^{-6}$ par degré centigrade à 300° K. (degrés absolus ou Kelvin.)
$5{,}9.10^{-6}$ par degré centigrade à 1.300° K. —
$7{,}3.10^{-6}$ par degré centigrade à 2.300 K. —

Celui du quartz à la température ordinaire est voisin de $0{,}5.10^{-6}$ et celui du verre le moins dilatable (le Pyrex) de $3{,}3\text{-}10^{-6}$. Ce verre se soude directement au tungstène et au molybdène.

identiques, si bien qu'un simple scellement ne serait pas étanche. On peut tourner la difficulté en mouillant le point d'émergence du fil de tungstène lors du scellement avec un peu d'anhydride borique ou phosphorique fondu. On adapte de plus aux sorties de petites cuvettes que l'on remplit de plomb fondu, d'un amalgame ou de cires. On réalise ainsi des joints étanches. On peut aussi souder les métaux au quartz par l'intermédiaire d'un élément réducteur et fusible comme l'aluminium (1) ou le cérium.

L'emploi du quartz ne permet pas le refroidissement aisé des électrodes par circulation d'un fluide réfrigérant, car il ne suffirait pas de monter celles-ci sur des tubulures de cette matière parcourues intérieurement par le fluide, par suite de la trop faible conductibilité de la silice. L'emploi des électrodes habituelles de verre à collet de platine pose la question de la soudure du verre au quartz.

Ce problème a été résolu par Weintraub (2) bien que d'une manière peu pratique. Il est nécessaire d'employer dix verres intermédiaires à coefficients de dilatation croissants pour pouvoir réunir ces deux substances d'une manière étanche.

Lorsque le tube ne doit pas être scellé et par conséquent non étuvé et qu'il doit demeurer sur une pompe, il est aisé d'employer une enceinte de quartz dans laquelle les électrodes sont montées au moyen de rodages graissés ou de masticages convenablement refroidis. Un tube de ce genre a été décrit par Whiddington (3).

Davies (4) construisit en 1896 un tube métallique (en aluminium) dans lequel l'anticathode était isolée et dont le fond hémisphérique constituait la cathode. Zehnder (5) a décrit un tube dans lequel le corps métallique était constitué par un cylindre de laiton muni d'une fenêtre transparente d'aluminium. Les électrodes étaient isolées par des tubes de porcelaine mastiqués. La pression était réglée par refroidissement d'un tube latéral à charbon. Un autre modèle, dans lequel la cathode est montée dans un isolateur de verre ou de porcelaine, est dû à Siegbahn et Hadding (6). Il est employé pour l'analyse des poudres cristallines par la méthode Debye-Hull et est représenté sur la figure 13. Il se compose d'une cloche en bronze — ou en acier à billes S. K. F. très homogène et très convenable pour cet usage — refroidie par l'eau courante. La cathode est mastiquée dans un long isolateur de porcelaine et est refroidie par une circulation d'eau isolée.

(1) B. Szilard, *Brevet français*, n° 461.240 (1913).
(2) *Gen. Electr. Rev.*, t. 17, p. 270 (1914).
(3) *Phil. Mag.*, t. 43, p. 1.116 (juin 1922).
(4) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 5 (juillet 1909).
(5) *Elektro. Zeits.*, t. 36, p. 40 (févr. 1915).
(6) *Zeits fur Phys.*, t. 3, p. 369 (1920).

L'isolateur est scellé sur la cloche par une rigole circulaire remplie à chaud de picéine fondue. L'anticathode, qui est généralement de cuivre

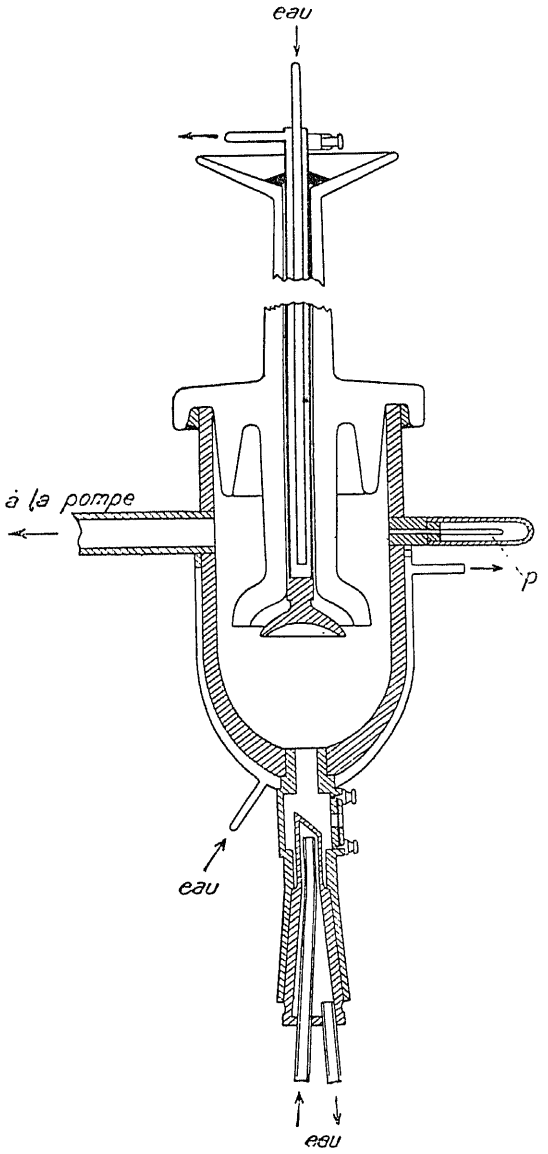


Fig. 13.

ou de fer, est montée sur un rodage et refroidie par la même circulation d'eau que la cloche. Elle est avantageusement mise au sol. La tubulure

qui l'entoure peut être munie de plusieurs fenêtres transparentes de manière à pouvoir utiliser le rayonnement pour 4 ou 5 analyses simultanées.

Une pression constante est assurée par le tube capillaire p (par exemple de 50 cm. de long et de 0,2 mm. de diamètre). Le courant gazeux suffit à prévenir l'entrée de la vapeur de mercure lorsque le tube est évacué par une pompe utilisant cet élément. On peut y dépenser une intensité moyenne de 20 m.-A sous 40 kV. max. Il ne permettrait cependant pas, par suite de sa forme même, un fonctionnement stable à des ten-

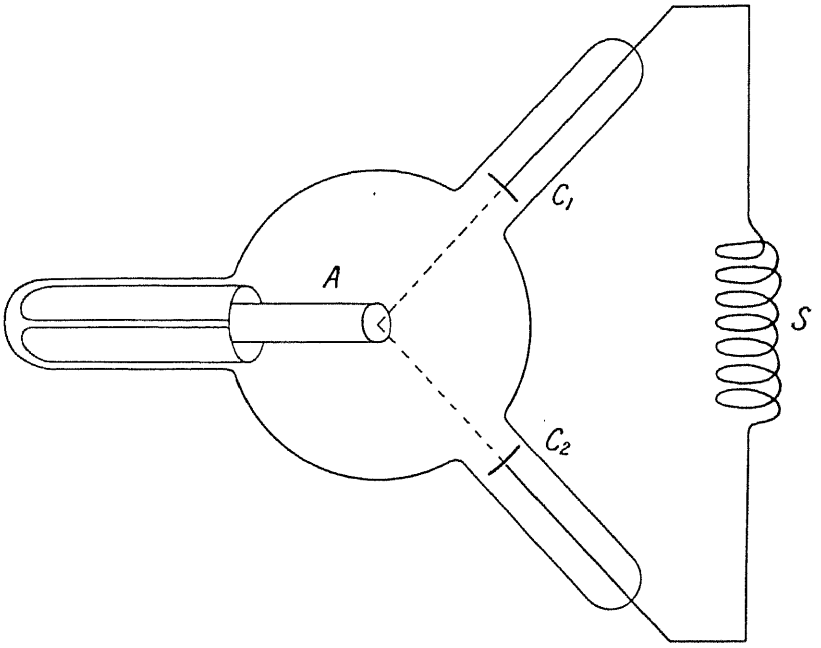


Fig. 14.

sions excédant 50 kV. F. Wever (1) y a remplacé la cathode d'aluminium par une cathode incandescente.

12. Tubes bicathodiques. — On a construit, dès la découverte de Röntgen, les tubes polycathodiques destinés à fonctionner directement sur une tension alternative monophasée ou triphasée. La figure 14 en représente un exemple (Wertheimer). Les deux extrémités du transformateur à courant alternatif S sont directement reliées aux deux cathodes C_1 et C_2. Chaque alternance est successivement utilisée par ces deux électrodes qui

(1) *Zeits. f. Phys.*, t. 14, p. 410 (avril 1923).

jouent tour à tour le rôle de cathode et d'anode. L'anticathode A sur laquelle se produit le foyer commun est isolée. Campbell-Swinton (1) a construit un four à rayons cathodiques sur ce principe. L'anticathode était une coupe d'iridium montée sur un support muni d'un bouchon rodé. Le tube absorbait 50 m.-A sous 10 kV. Il permettait la transformation rapide du diamant en graphite (1.890° C) et la fusion de l'alumine (1.877° C).

On peut aussi, comme l'a fait Guilloz (2), se passer d'anticathode et utiliser un tube cylindrique dont les deux électrodes symétriques jouent alternativement le rôle de cathode et d'anticathode. Les électrodes de Guilloz étaient des disques plans de chrome, qui constituent de bonnes

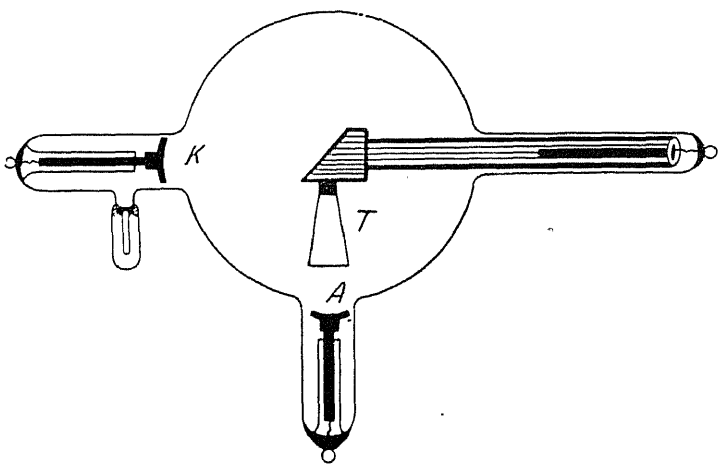


Fig. 15.

cathodes ne se pulvérisant que peu, mais qui, par contre, sont des anticathodes de faible rendement. Ce tube servait à la stéréoradioscopie.

Des tubes bicathodiques du type de la figure 14, dans lesquels les deux foyers étaient rendus distincts, ont été utilisés pour le même usage en les conjuguant avec un système de volets synchrones au travers desquels l'observateur voyait l'écran (Villard).

Koch et Sterzel ont construit sur ce principe un tube (voir fig. 15) susceptible de fonctionner sur une f. e. m. susceptible de s'inverser sans dommage pour l'ampoule. C'est aussi un tube bicathodique, mais, des deux cathodes K et A, la première seule sert à la production du faisceau cathodique. Un entonnoir métallique T porté par l'anticathode est en effet disposé devant la seconde A, de manière à disperser l'afflux et à empêcher

(1) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 5, p. 59 (mai 1909).
(2) *C. R.*, t. 134, p. 1303 (1902).

la formation de rayons cathodiques sur cette électrode. Comme pour le tube précédent, les deux électrodes K et A sont directement reliées aux bornes du générateur et l'anticathode est isolée. Nous retrouverons le principe de l'électrode positive dispersant l'afflux en étudiant les soupapes cathodiques.

Au lieu de prévenir le passage du courant inverse dans le tube on peut au contraire le favoriser en ayant soin de le rendre inoffensif. Fürstenau (1) a essayé de construire un tel tube (Radiologie). L'anode était munie d'une petite cathode latérale en aluminium disposée dans une tubulure auxiliaire, en face d'une anticathode de platine reliée à l'anticathode principale. L'onde inverse suivait ce circuit de moindre résistance plutôt que d'envoyer des rayons cathodiques dans l'ampoule.

Ce système ne saurait cependant être efficace car on ne fait ainsi que disposer deux tubes en série et l'on n'évite nullement de rendre négative l'anticathode principale. On rend de plus impossible la mesure du courant utilisé pour la production des rayons X.

13. Stabilité du fonctionnement. — On a cherché a accroître la stabilité de fonctionnement des tubes en y entretenant une ionisation artificielle produite soit par l'introduction d'une substance radioactive, soit par l'emploi d'une source auxiliaire ionisante.

Le premier procédé (2) semble d'une efficacité douteuse et sa réalisation serait tout au moins d'un prix prohibitif. Le second paraît avoir été imaginé par Bonetti (3) qui portait à l'incandescence par effet Joule un fil de platine, pendant un temps plus ou moins long, dans l'atmosphère de l'ampoule et qui rendait ainsi utilisable un tube trop dur. Il est difficile de savoir quelles parts respectives jouaient dans ce phénomène la libération des gaz occlus et l'action ionisante du filament incandescent. Ce procédé a été repris d'une manière plus précise par Fürstenau (4) qui a montré qu'un tube à gaz, dans lequel la pression était trop faible pour assurer l'alimentation en afflux de la cathode, redevenait capable de fonctionner si l'on portait à l'incandescence un corps matériel disposé au contact du gaz, par exemple l'anticathode. Cette invention consistait donc à introduire dans l'ampoule un filament incandescent disposé sur l'anticathode, la cathode, ou une tierce électrode quelconque. Le gaz résiduel était *ionisé par contact* et le débit était rendu, dans une large mesure, indépendant

(1) Voir *Arch. Electr. Med.*, p. 406 (1910).
(2) JAHODA, *Brevet français*, n° 476.881 (1914).
(3) *C. R.*, t. 126, p. 1893 (1898).
(4) *Deuts. Reich. Pat.*, n° 271.306 (avril 1912).

de la pression et contrôlé seulement par la température du filament. Il va de soi que ce dispositif n'avait *rien de commun* avec le tube à pure émission électronique de Coolidge. Fürstenau a cependant réussi à obtenir temporairement en Allemagne un droit de priorité.

La méthode développée auparavant par J. E. Lilienfeld (1) était beaucoup plus originale. Le tube réalisé à cette époque (voir fig. 16) avait l'aspect extérieur et les électrodes (cathode C, anticathode A au sol) d'un tube à gaz, mais il possédait en outre un circuit à basse tension consistant en un fila-

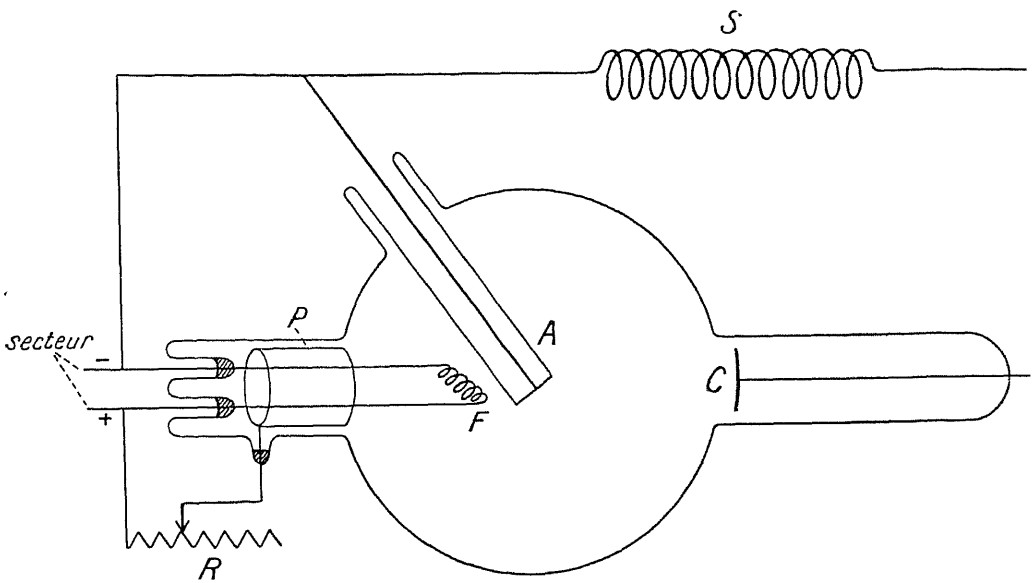


Fig. 16.

ment F, ou une cathode de Wehnelt, et un cylindre métallique P servant d'anode. Le filament était chauffé à une température constante et donnait lieu à une émission électronique, non purement thermique, dans le cas d'une cathode de Wehnelt. L'intensité du courant auxiliaire (de 50 à 180 milliampères) était réglée par une résistance R contrôlant le potentiel positif du cylindre. Suivant cette intensité le gaz résiduel se trouvant entre F et P était plus ou moins ionisé, en donnant naissance à un nombre d'*ions positifs* d'autant plus élevé que le flux électronique était plus considérable, comme cela a lieu dans la jauge à ionisation.

(1) *Ann. der Phys.*, t. 32, p. 673 (1910) et *Forts. auf. dem. Geb. d. Röntgen*, t. 18, p. 256 (1912).

L'intensité de l'afflux cathodique en C, et par suite celle du faisceau cathodique, étaient réglées par la résistance R et l'on avait réalisé un tube dans lequel l'intensité du courant était indépendante de la tension appliquée (entre C et A) et, dans une large mesure, de la très faible pression résiduelle.

Lilienfeld a pensé avoir obtenu dans ce tube une pression suffisamment basse pour que l'ionisation ne puisse y jouer aucun rôle appréciable et avoir ainsi construit le premier tube purement électronique. Cette prétention ne saurait être maintenue avec ce que nous savons aujourd'hui de la décharge dans les gaz ultra-raréfiés.

Cet appareil n'a guère été utilisé dans la pratique car il ne pouvait supporter de très hautes tensions. Le champ intense appliqué entre C et A perturbait celui existant entre F et P, si bien qu'il se produisait des oscillations. Le tube Lilienfeld moderne que nous décrirons plus loin n'a rien de commun avec ce dispositif, mais ce principe pourrait être utilisé pour la création d'une *pompe thermoionique* susceptible de produire des vides élevés, le gaz résiduel étant ionisé par un circuit filament-grille et dirigé sous forme d'afflux, par un champ électrique convenable, dans une cathode tubulaire d'évacuation. La même disposition pourrait être appliquée à la construction d'un spectrographe à rayons positifs à grand débit susceptible de réaliser une séparation appréciable d'isotopes gazeux.

On pourrait enfin construire un tube à afflux *privé d'atmosphère* en disposant en face de la cathode une anode incandescente à pièce de concentration et débit réglable. L'afflux produit exciterait par son impact, à la manière ordinaire, le faisceau cathodique qui serait dirigé, par une concentration convenable, sur l'anticathode. Il va sans dire qu'un tube de ce genre devrait fonctionner sur une pompe et serait d'un emploi peu pratique bien qu'ayant théoriquement la souplesse du tube Coolidge.

En définitive, les tubes à afflux ne semblent convenables, ni pour réaliser des générateurs à très haute tension, ni de très grande puissance, car leur point faible est la cathode. Il est aussi très difficile de construire des tubes présentant exactement les mêmes caractéristiques et donnant, dans les mêmes conditions *apparentes* d'excitation électrique, le même rayonnement Röntgen, car la formation et la distribution de l'afflux sont très sensibles aux petites variations de forme et de métallisation des ampoules.

Nous verrons que les tubes à pure émission d'électrons se prêtent beaucoup plus facilement à la solution de ces problèmes.

CHAPITRE II

CATHODES INCANDESCENTES

L'émission électronique pure et spontanée par les corps incandescents a fait l'objet d'une étude complète due à M. E. Bloch et faisant partie de cette série de Conférences-Rapports (E. Bloch : *Les Phénomènes thermo-ioniques*). Nous ne reviendrons donc pas ici sur ce sujet et nous nous bornerons à en décrire les applications à la technique des rayons Röntgen.

1. Cathode de Wehnelt. — Wehnelt (1) a imaginé une cathode remarquable constituée par un fragment d'oxyde d'un élément électropositif (depuis les alcalino-terreux jusqu'aux tétravalents) déposé sur une mince lame de platine susceptible d'être portée à l'incandescence par effet Joule. Une gouttelette de cire à cacheter carbonisée *in situ* suffit à constituer une cathode de ce genre. Un filament de Nernst (20 % Y^2O^3, 80 % ZrO^2) jouit des mêmes propriétés.

L'intérêt de cette cathode est qu'elle possède une chute extrêmement réduite, indépendante de l'intensité et qu'elle permet d'obtenir des faisceaux cathodiques très intenses de l'ordre de l'ampère. La chute cathodique peut d'ailleurs être réglée en agissant sur la température. D'après Soddy (2) la cathode de Wehnelt ne serait pas une électrode à pure émission thermo-électronique, mais une *cathode à afflux* très sensible. L'oxyde dont elle est recouverte se trouverait dissocié par l'élévation de température et par l'impact de l'afflux et l'élément électropositif libéré donnerait lieu, sous cette double influence, à une émission électronique considérable. Soddy a en effet montré que cette cathode cessait de fonctionner lorsqu'on réduisait suffisamment la pression au moyen de son four à calcium. Cependant Richardson et Soddy (3) ont expliqué ce résultat par le fait que Soddy avait observé des courants de l'ordre de l'ampère

(1) *Ann. der Phys.*, t. 14, p. 425 (1904).
(2) *Nature*, t. 71, p. 53 (1907).
(3) *Nature*, t. 77, p. 197 (janv. 1908).

par cm² pour lesquels l'ionisation résiduelle joue un rôle essentiel et ont conclu avec Wehnelt que l'émission, aux très basses pressions, était bien purement thermo-électronique. Cette cathode ne saurait être utilisée dans un tube à rayons X devant fonctionner à très haute tension, par suite de la destruction de son oxyde résultant de l'intense bombardement qui aurait alors lieu. Wehnelt et Trenkle (1) n'ont guère pu, par exemple, dépasser un millier de volts. Elle peut cependant rendre des services pour la construction d'un *four* à rayons cathodiques fonctionnant à basse tension, ou d'un oscillographe de Braun.

2. Cathode Coolidge. — La création d'un tube à rayons X à vide élevé et muni d'une cathode incandescente est due à W. D. Coolidge (2) du Laboratoire de recherches de la General Electric Cº (Shenectady, New-York). C'est incontestablement le plus grand perfectionnement qui ait été apporté à la technique depuis la découverte de Röntgen. Il a pu être réalisé à la suite de travaux d'une importance capitale qui sont : l'invention par Gaëde de pompes à vide élevé et de grande vitesse d'évacuation (pompes rotatives à huile et à mercure, pompe moléculaire, pompe à diffusion) ; la découverte par Coolidge (1912) d'un procédé de fabrication industrielle du tungstène ductile et celle, par Irving Langmuir (1913), de l'émission électronique pure de cet élément dans un vide suffisamment élevé.

Tube Coolidge Standard. — Coolidge s'attacha tout d'abord à construire une anticathode de tungstène pour tubes à gaz, puis une cathode de même métal. Il remarqua que cette dernière ne fonctionnait normalement que lorsqu'elle était portée à l'incandescence par la décharge. Il fut ainsi amené à la chauffer artificiellement par effet Joule et à évacuer le tube autant qu'il fut possible pour en assurer la stabilité, la pression devant être inférieure à une demi-barye pour que les ions positifs ne jouent plus aucun rôle appréciable.

La figure 17 représente (3) les diverses sortes de cathodes filiformes et de pièces de concentration qui furent successivement expérimentées. Un petit filament de tungstène F, droit ou boudiné cylindriquement ou coniquement, est monté dans l'ampoule comme l'est celui d'une lampe à incandescence. Il peut être porté à telle température que l'on désire par la batterie B en agissant sur la résistance R. Si l'on se contentait de disposer ainsi une source punctiforme d'électrons en face d'une anticathode, toute

(1) *Sitzungsber, Phys. Med. Soc. Erlangen*, t. 37, p. 312 (1905).
(2) *Phys. Rev.*, p. 409 (déc. 1913).
(3) Compagnie Thomson-Houston, *Brevet français*, nº 462.512 (sept. 1913).

la surface de celle-ci serait bombardée sans production d'un foyer ponc-

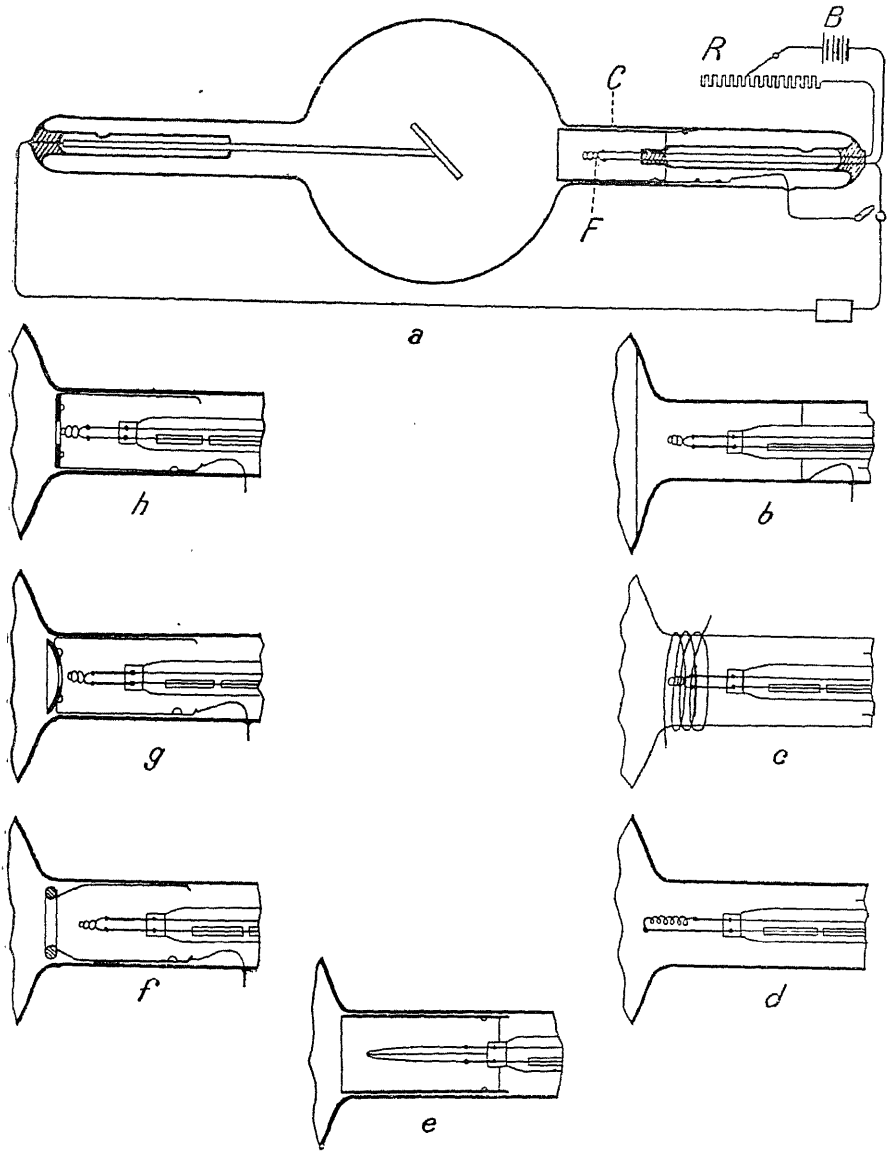


Fig. 17.

tuel. Il est nécessaire de disposer autour du filament une pièce métallique créant des surfaces équipotentielles de forme convenable pour qu'il se pro-

duise un faisceau cathodique délié. Sur le schéma *a*, c'est un cylindre métallique *c* connecté à la cathode. La concentration est d'autant plus accentuée que le filament y est davantage enfoncé et que le diamètre du tube est plus petit. Ce peut être aussi un disque plat perforé *h*, un disque concave *g*, un anneau *f* ou même une simple argenture du verre comme en *b*. Au lieu d'une concentration électrostatique, on peut aussi employer un champ magnétique comme en *c*. On peut enfin réaliser (1) une concentration électrique réglable en connectant le cylindre isolé avec une source à faible potentiel variable ou en le déplaçant (il est alors construit en un métal magnétique) au moyen d'un solénoïde coaxial extérieur mobile.

Dans tous les cas, la forme et la définition du faisceau cathodique peuvent se prévoir en traçant les surfaces équipotentielles au voisinage du filament. Les électrons suivront, comme dans un tube à gaz, les lignes de force normales à ces surfaces. Mais la chute cathodique étant ici, inexistante, par suite de l'absence de l'afflux, les électrons sortiront du filament avec de très faibles vitesses — correspondant à quelques volts — si bien que leurs trajectoires seront très sensibles à toute modification de la distribution du champ au voisinage du filament. Le gradient de champ étant à peu près constant, entre la cathode et l'anticathode, ils augmenteront ensuite progressivement leur vitesse en devenant de moins en moins sensibles à toute action électrostatique ou magnétique, à tel point que l'on peut, tout comme dans un tube à gaz, les enfiler dans un anneau porté au potentiel de l'anticathode et placé un peu en avant de celle-ci, sans les disperser en aucune façon.

On ignore encore tout de la *structure* du faisceau cathodique dans un tel tube. Un calcul simple montre seulement que les électrons y sont extrêmement raréfiés, leur distance moyenne étant de l'ordre du vingtième de millimètre dans les conditions habituelles. Il y a des raisons théoriques de croire que les corpuscules n'y sont pas désordonnés et que le faisceau présente une structure réticulaire. Une observation due à Hull (2) sur les trajectoires électroniques dans le magnétron est favorable à cette hypothèse.

La pression étant assez basse pour que les ions positifs résiduels ne jouent plus un rôle appréciable, la charge négative de la paroi ne peut plus être neutralisée, ni son bombardement électronique entretenu. Elle ne s'échauffe donc pas et n'est le siège d'aucune fluorescence.

Cette disposition de la cathode n'était cependant pas satisfaisante pour deux raisons qui toutes deux limitaient beaucoup l'intensité du courant

(1) COMPAGNIE THOMSON-HOUSTON, *Brevet français*, n° 462.512, 2°add. (sept. 1914).
(2) A. W. HULL. *Phys. Rev.*, t. 23, p. 112 (janv. 1924).

pouvant traverser l'ampoule. La première est que, les rayons cathodiques secondaires, issus de l'anticathode, chargent négativement toute la surface interne du ballon, et que cette paroi prolonge démesurément le tube de concentration en s'opposant au passage des électrons. En outre, avec une source électronique telle que celles figurées en *d* et *e*, c'est uniquement la partie extrême du filament, du côté de l'anticathode, qui émet des électrons. Les surfaces équipotentielles ne pénètrent en effet que faiblement dans le tube de concentration. Un perfectionnement important (1) a consisté

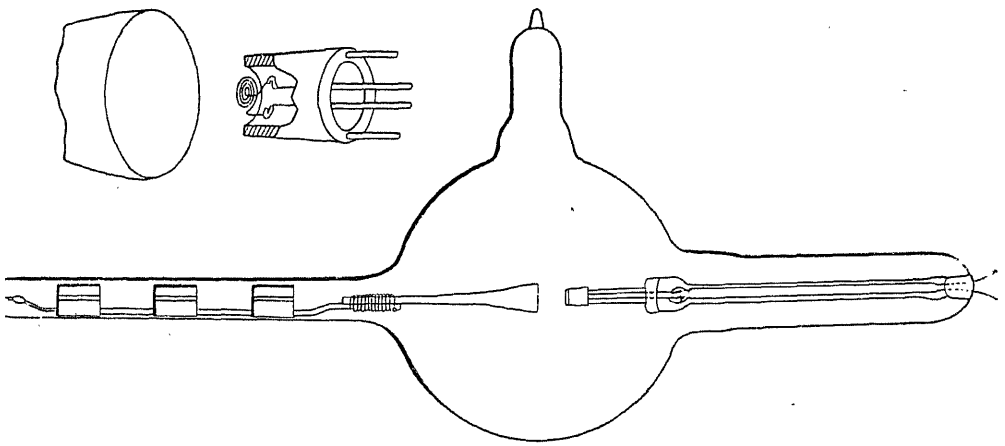


Fig. 18.

à réduire considérablement le diamètre du cylindre de concentration et à le disposer au voisinage de l'anticathode (voir fig. 18).

En même temps le filament était enroulé suivant une spirale plane, ou mieux conique, pour accroître l'écartement des spires, légèrement enfoncée (de 1 mm.) dans le cylindre et connectée avec lui à l'intérieur de l'ampoule. Le tube et les tiges de support étaient de molybdène. Elles étaient soudées dans un pied en verre Pyrex (borosilicate de magnésium [ou d'aluminium] et de sodium) réuni au verre de l'ampoule par une série de collets de verre à coefficients de dilatation intermédiaires, obtenus par mélange en proportions convenables des deux sortes extrêmes des verres à réunir.

Cette disposition n'a été que peu modifiée dans la suite : le pied en verre Pyrex a été remplacé par un cylindre en acier, fendu suivant une généra-

(1) COMPAGNIE THOMSON-HOUSTON, *Brevet français*, n° 642.512, 1re add. (juillet 1914).

trice, de manière à faire ressort et à se fixer sur un tube de verre (voir fig. 19). L'anticathode, qui est constituée par le bloc de tungstène forgé *a*, a été sertie sur une tige de molybdène qui la supporte et qui est montée à la manière du dispositif cathodique.

La spirale de tungstène est constituée par un fil d'environ 0,2 mm. de diamètre faisant une demi-douzaine de tours et ayant un diamètre extérieur de 3,5 mm. Elle est soudée électriquement sur les deux tiges de molybdène qui la supportent. Celles-ci sont réunies à des fils de cuivre eux-mêmes soudés aux fils de platine traversant le verre. Ce métal est aujourd'hui remplacé par un ferro-nickel connu sous le nom de Dumet, ayant le même coefficient de dilatation que le verre sodique et recouvert par électrolyse d'une mince couche de cuivre qui, au contact du verre fondu,

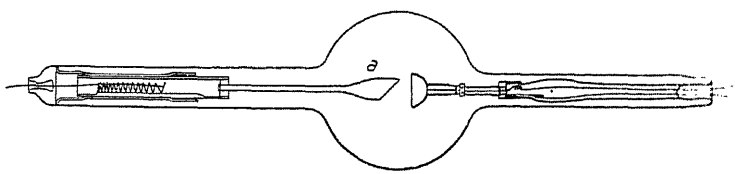


Fig. 19.

forme un émail cuivreux. Des collets de cet alliage peuvent aussi remplacer ceux de platine dans les tubulures d'anticathode.

Le tube que nous venons de décrire est désigné sous le nom de « Standard ». Il possède un ballon de 18 cm. de diamètre et a une longueur totale d'environ 60 cm. (1). Il peut supporter dans l'air une tension de 125 kV. max. correspondant à une étincelle équivalente mesurée entre pointes d'environ 25 cm. Spécialement évacué et immergé dans l'huile, cette limite est reportée à plus de 200 kV. (40 cm. d'étincelle).

Coolidge et Kearsley (2) ont récemment décrit un tube fonctionnant dans l'air sous des tensions atteignant 300 kV. max. qui ne diffère des précédents que par sa longueur qui est de 80 cm. et par la distance des électrodes qui a été doublée (50 mm. au lieu de 25 mm.) afin de diminuer l'attraction du filament par l'anticathode et d'éviter son déroulement. Cet accident pourrait se produire si l'on employait ces

(1) L'emploi de ballons de 10 cm. de diamètre, tenté par Coolidge pour réduire la fragilité, n'a pas donné de résultats satisfaisants, la puissance étant trop limitée par l'échauffement de la paroi de verre. La métallisation de l'ampoule due à l'évaporation du filament et du point d'impact est aussi beaucoup plus prononcée. Par contre, un tube de 6 cm. de diamètre en quartz fondu a supporté une puissance continue de 2 kilowatts.

(2) *The Am. Journ. of Röntg.*, t. 9, p. 77 (février 1922).

tubes comme soupapes, la température devant être très élevée tandis que l'alternance arrêtée est très grande. La figure 20 représente le tube de ce type construit en France par les Établissements Gaiffe-Gallot et Pilon.

L'intensité du courant est, dans ces tubes, pratiquement indépendante de la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes lorsque le tube fournit des rayons X. Elle ne dépend que de la température du filament, et, lorsqu'elle n'est pas très élevée, suit la loi d'émission de Richardson.

Le courant de saturation est toujours obtenu sous une tension beaucoup plus faible que celles correspondant à l'usage courant. Il faut de 3 à 4 ampères sous une dizaine de volts pour porter le filament aux températures

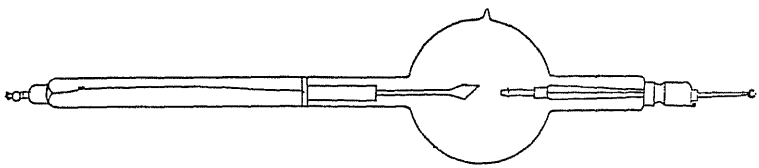


Fig. 20.

exigées pour l'émission de quelques milliampères (2.500° K.). On utilise dans ce but, soit des accumulateurs isolés, soit des transformateurs. La capacité calorifique du filament est suffisante pour que le chauffage intermittent (80 fois par seconde sous 40 périodes) ne trouble pas notablement le régime du tube.

Coolidge (1) s'est attaché à établir une cathode donnant une distribution d'énergie aussi uniforme que possible au foyer. La dimension de celui-ci est déterminée par la forme du filament, sa disposition dans la cupule de concentration, la forme de celle-ci, la distance des deux électrodes et la forme de l'anticathode. Avec les filaments spiralés le plus souvent employés dans ces tubes et le cylindre de concentration décrit plus haut, le foyer est d'autant plus fin que le filament est plus distant de l'orifice et que ce dernier est plus éloigné de l'anticathode. On observe le contraire si le petit tube de concentration est muni — du côté de l'anticathode — d'une large pièce hémisphérique (voir fig. 19 et 23), d'environ 25 mm. de diamètre, que nous retrouverons dans le tube Coolidge dit « à radiateur ». Il faut alors, pour avoir le meilleur foyer, disposer le plan du filament tangentiel-

(1) *Am. Röntg. Roy. Soc.* (sept. 1916) ; *Am. Journ. of Röntg.* (1917).

lement à la surface de la sphère et rapprocher autant que possible — à quelques millimètres de distance — cette cupule de l'anticathode. Les deux électrodes ne doivent pas dans ce cas être coaxiales par suite de la déformation des lignes de force due à la section (45°) de l'anticathode. Il faut abaisser l'axe de la cathode, par exemple en pliant légèrement ses tiges de support, pour amener le foyer au centre de la face active de l'anode. Le faisceau cathodique est alors légèrement incurvé.

Cette disposition a un autre avantage : lorsque le foyer est porté à une température élevée (1) (au-dessus de 2.000° K.), il peut émettre des électrons si la tension se trouve inversée. Il en résulterait la formation d'un faisceau cathodique normal à la face active de l'anticathode qui, rencontrant la paroi de verre au-dessous de la cathode, la percerait par fusion. En rapprochant beaucoup la cupule de molybdène et en l'inclinant vers le bas, elle intercepte ce faisceau. Le point incandescent formé peut à son tour se comporter comme cathode et donner naissance à un troisième foyer sur l'anticathode, mais la paroi de verre demeure protégée.

Le foyer ne dépend ni de l'intensité du courant ni de la grandeur du champ, mais uniquement des conditions géométriques et de la forme du filament. Celui-ci est loin d'être isotherme, par suite de l'action refroidissante des jonctions. Aussi est-ce la spire moyenne, dont la température est maxima, qui est la source principale d'électrons. Le faisceau cathodique est dans l'espace une nappe spiralée donnant sur l'anticathode une véritable *image* du filament. On observe même souvent, avec certains tubes à large foyer, une altération du métal anticathodique suivant une spirale qui est une figure homothétique agrandie du filament.

Mais cette source principale de rayons X n'est pas la seule observable dans ces tubes. Nous avons vu que les rayons cathodiques diffusés au foyer — et ils sont aussi abondants que dans un tube à gaz — chargeaient tout d'abord négativement la paroi interne du ballon. Leurs trajectoires ultérieures se trouvent donc incurvées par la triple action de la cathode, de la charge de l'espace et des parois. Ils bombardent alors à nouveau la surface de l'anticathode, probablement plusieurs fois de suite, si bien que toute la surface de celle-ci, jusqu'au point où elle pénètre dans la tubulure de verre anodique, devient une source notable de rayons X lorsqu'elle est constituée par un élément lourd comme le tungstène ou le molybdène. Cette émission parasite a été étudiée par Coolidge

(1) Le mode de refroidissement naturel de l'anticathode est le rayonnement thermique. Elle atteint très rapidement une température élevée car sa capacité calorifique totale ne dépasse pas 10 calories.

et Moore (1) au moyen d'un dispositif très simple employé dès la découverte de Röntgen pour localiser le point d'émission des nouveaux rayons dans l'ampoule de Crookes.

Il consiste à disposer entre le tube et une plaque photographique un écran de plomb perforé d'un trou circulaire de très petit diamètre (par exemple d'un demi-millimètre). C'est l'équivalent d'un appareil photographique à trou. Si l'écran est disposé à égale distance de la plaque et du foyer, on obtient une image renversée mais de grandeur égale à la source. Si l'on veut étudier le foyer proprement dit, on dispose la plaque photographique parallèlement au plan de la face active de l'anticathode. Dans tous les cas, il faut avoir soin d'éviter la surexposition.

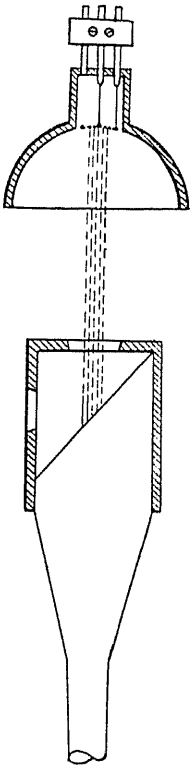


Fig. 21.

Les figures 1 et 2 de la Pl. I représentent quelques clichés obtenus par cette méthode. Le premier montre l'influence du diamètre du ballon à la fois sur l'aire focale et sur la surface bombarbée, le second, l'influence de la vitesse des électrons. Le cliché supérieur est ici effectué sous 130 kV. max., l'autre sous 40 kV. max. Les temps de pose sont choisis de manière à donner la même impression au point focal. On voit qu'à haute tension, le molybdène rayonne plus que le tungstène et que c'est l'inverse qui a lieu à basse tension. Les rayons K du molybdène, auxquels est due la différence, sont en effet plus fortement excités dans le premier cas que ceux du tungstène, car leur tension critique d'apparition est bien moindre (20 kV. au lieu de 70 kV.).

Coolidge et Moore ont montré que ces rayons parasites avaient une pénétration moyenne presque égale à celle des rayons directs et que, par conséquent, la vitesse des rayons cathodiques diffusés devait être peu inférieure à celle des rayons primaires. L'intensité globale de ce rayonnement, mesurée photographiquement dans la direction d'utilisation, était voisine du dixième de celle des rayons directs.

Lorsqu'on prolonge le temps d'exposition, on voit apparaître sur ces clichés l'image de la pièce de concentration de molybdène sans que celle du filament ne devienne visible. Cette image a une origine toute différente

(1) *Gen. Electr. Rev.*, p. 272 (avril 1917).

de celle des précédentes : elle est due à la fluorescence de haute fréquence. Les rayons L du tungstène sont presque entièrement arrêtés par la paroi de verre tandis que les rayons K du molybdène, beaucoup plus pénétrants, donnent une forte impression.

Coolidge a cherché (1) à éviter cette source parasite qui, dans certains cas radioscopiques (radioscopie de régions minces, localisation de corps étrangers, emploi des filtres Bücky) rend le tube Standard inférieur aux tubes à gaz. Il a ainsi construit une anticathode encapuchonnée (voir fig. 21) d'un cylindre de molybdène percé de deux orifices : l'un pour l'entrée du faisceau cathodique, l'autre pour la sortie des rayons utilisés, ce dernier pouvant même être obturé par une mince feuille de molybdène qui constitue un bon filtre. Les rayons cathodiques diffusés sont ainsi presque totalement arrêtés par le capuchon et les images deviennent très bonnes en même temps que la protection de l'opérateur est grandement facilitée. La métallisation de l'ampoule est également diminuée.

Une autre méthode expérimentée a consisté à disposer la pièce de concentration cathodique au voisinage immédiat (à 2,5 mm.) de la face active de l'anticathode. Celle-ci était alors, comme il est représenté sur la figure 18, sectionnée normalement à l'axe du tube. Les électrons diffusés au foyer, y sont ramenés électrostatiquement et le rendement est augmenté d'un cinquième. La cupule cathodique pourrait même déborder un peu l'extrémité de l'anticathode, les rayons sortant par un orifice recouvert d'un mince filtre de molybdène. L'inconvénient de ce dispositif est qu'il devient difficile d'éviter le déroulement du filament par attraction électrostatique et, qu'à très haute tension, il peut éclater des étincelles (décharges de Wood-Millikan) entre les deux électrodes. La radiation thermique du foyer agit aussi sur la température du filament.

La disposition rectangulaire des deux électrodes (comme dans le tube Coolidge à radiateur dentaire) améliore un peu la source, la majeure partie de l'anticathode n'étant pas vue dans la direction d'utilisation qui coïncide avec l'axe de l'anticathode.

Coolidge a aussi expérimenté un diaphragme interne consistant en un écran de tungstène ou de molybdène percé d'un trou et disposé entre l'anticathode et la région d'utilisation. Ce diaphragme était supporté par la cathode, ou isolé et fixé dans la tubulure anodique. Dans tous les cas, il prend le potentiel de la cathode et n'est pas bombardé. Il n'émet donc pas de rayons X directs.

L'emploi d'un tube de quartz enrobant à quelque distance l'anticathode

(1) *Am. Journ. of Röntg.*, t. 2, p. 882 (1915).

peut aussi être suggéré, mais ce tube deviendrait rapidement opaque en se recouvrant intérieurement d'un film métallique et serait exposé à fondre.

Aucun de ces dispositifs n'est entré dans la pratique courante car Coolidge a imaginé pour le radio-diagnostic un tube dit « à radiateur » dans lequel l'anticathode se compose d'une barre de cuivre portant, d'une part un disque anticathodique de tungstène, de l'autre, un radiateur se refroidissant dans l'air ambiant. Les rayons cathodiques diffusés bombardent cette tige de cuivre et en excitent fortement les rayons K, mais ceux-ci sont presque entièrement absorbés par la paroi de verre, si bien que les images radioscopiques obtenues sont aussi bonnes que celles fournies par un tube à gaz. En radiographie, le tube Standard donne d'aussi bons résultats lorsque les clichés ne sont pas surexposés car le rayonnement diffusé par le sujet est une cause de voile beaucoup plus importante que l'imperfection du foyer.

Tube Coolidge à radiateur (1). — Ce modèle a été construit pendant la guerre pour répondre à la demande du corps expéditionnaire américain

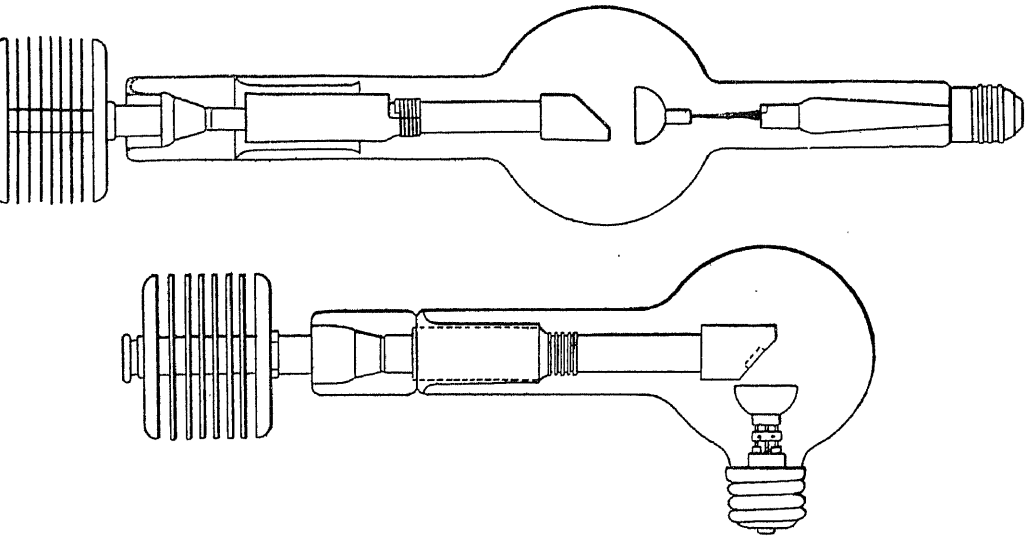


Fig. 22.

en France, d'un tube essentiellement transportable, de dimensions réduites, assez puissant pour permettre le radiodiagnostic et susceptible de fonctionner sous une différence de potentiel alternative. Il ne diffère du tube Standard (voir fig. 22) que par son anticathode qui, au lieu de se refroidir par

(1) *Gen. Electr. Rev.*, p. 56 (janvier 1918)

rayonnement, le fait par conduction dans une barre de cuivre de 1,6 cm. de diamètre, pesant 860 gr., et ayant une capacité calorifique de 81 calories. Cette barre est soudée à l'argent sur un collet tronconique de platine ou de Dumet raccordé au verre du col anodique. Le disque de tungstène anticathodique a une épaisseur de 2,5 mm. et un diamètre de 9,5 mm. Il est enrobé dans le cuivre par fusion de ce métal dans le vide sur le tungstène. L'absence de radiation thermique importante a permis de réduire le diamètre du ballon à 9,5 cm.

Ce tube se construit en deux modèles qui ne diffèrent que par la dimension du foyer. Le premier a une surface focale d'environ 3 mm. de diamètre et peut supporter 10 milliampères moyens sous 65 kV. efficaces — limite supérieure de la tension nécessaire au diagnostic (1) — pendant une minute ou 5 m. A en régime permanent (200 watts). Le second a un foyer de 5 mm. et peut supporter pendant 20 secondes une intensité de 30 m. A, mais sa puissance moyenne est évidemment la même.

Il n'est pas douteux qu'en augmentant la dimension du foyer on puisse admettre dans un tube de ce genre une intensité instantanée de plusieurs centaines de milliampères.

L'emploi d'un radiateur, qui avait déjà été utilisé pour des tubes à gaz, est beaucoup plus pratique que celui d'un réservoir d'eau bouillante, car le tube peut être placé dans n'importe quelle position et la sujétion du niveau de l'eau est évitée. Le tube est, de plus, muni d'une cupule protectrice sphérique (2) amovible, ajustable en deux parties, faite de verre au plomb, épaisse de 7 mm. et correspondant à 2 mm. de ce métal (voir fig. 3, Pl. I). Il est possible de préparer des verres contenant davantage de silicate de plomb et tels par exemple qu'ils ne soient pas plus épais que 1,4 fois un écran de plomb assurant la même protection, mais ces verres attaquent rapidement les pots lorsqu'ils sont fondus. Les verres de cette opacité ne peuvent se souffler et ces cupules sont obtenues par compression dans des moules.

L'évacuation de ces tubes s'est révélée être un problème d'une solution difficile par suite de la présence d'une masse importante de cuivre retenant facilement des gaz et de l'oxyde et ne permettant pas de porter le tungstène à une température suffisamment élevée pour le libérer de ses propres occlusions. Il serait nécessaire pour construire un tel tube de fondre dans le vide à la fois le cuivre et le tungstène, mais cette opération, facile à réaliser pour le premier de ces éléments, n'est pas aisée pour le second,

(1) TURCHINI a montré que l'éclat d'un écran de platinocyanure de baryum n'augmente plus au-dessus de 70 kv. (*C. R.*, août 1905).

(2) Le « becquet », ou appendice de scellement, est alors reporté à l'extrémité de l'une des tubulures et est recouvert par la douille ou le capuchon.

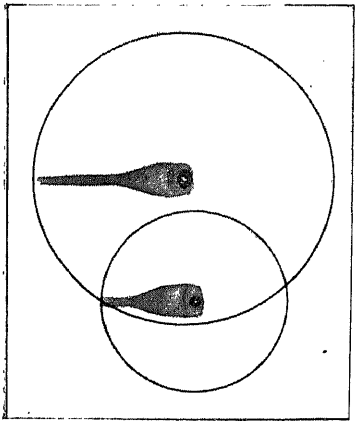


Fig. 1.

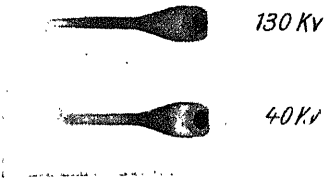


Fig. 2.

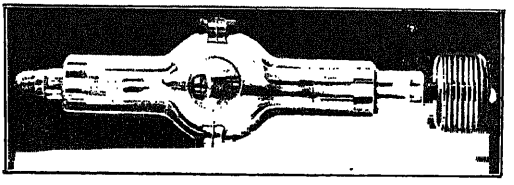


Fig. 3.

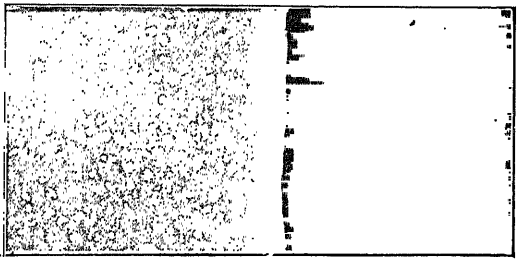


Fig. 4.

quoique ayant été résolue récemment. Elle était en tout cas incompatible avec une fabrication rapide et peu coûteuse de ces anticathodes.

Coolidge a simplement utilisé du cuivre traité au bore par le procédé de Weintraub (1). Le sous-oxyde de bore, qui est un sous-produit de la préparation du bore pur, est un des rares réducteurs n'ayant aucune affinité pour le cuivre. Il suffit de fondre le métal industriel dans un creuset brasqué avec cette substance pour le débarrasser de l'oxygène et des oxydes de carbone et de cuivre qu'il renferme et obtenir un métal homogène doué d'une conductibilité et de qualités mécaniques supérieures. La figure 4 de la Pl. I montre des radiographies comparées du même métal industriel traité ou non par ce procédé.

Même avec ce cuivre purifié, il est nécessaire de chauffer préalablement très fortement le tube en présence d'une atmosphère d'hydrogène pour qu'il puisse être évacué définitivement et scellé.

Malgré ces précautions, les tubes Coolidge à radiateur présentent quelques particularités de fonctionnement fort intéressantes au point de vue de la décharge électronique dans les vides élevés qui nous arrêteront un instant.

Coolidge (*loc. cit.*) a montré que, si l'on charge le tube sous une tension alternative, au point de porter le foyer à une température supérieure à celle du filament, il ne passe aucun courant inverse, comme cela aurait lieu dans un tube Standard. De plus, si on le fait fonctionner avec 10 m. A moy. sous 65 k V. eff. pendant plus d'une minute, on constate que l'intensité du courant baisse rapidement, si bien qu'au bout de 2 1/2 minutes, il ne passe plus que 6 m. A. L'anticathode est alors à la température du rouge. Celle du filament n'a pas changé. Si l'on arrête à ce moment le fonctionnement en laissant la cathode allumée, on retrouve — dès que l'anticathode s'est refroidie — les conditions initiales et l'intensité est de nouveau de 10 m. A.

Les phénomènes s'expliquent facilement comme nous l'avons montré (2) à partir des beaux travaux de Langmuir sur l'« empoisonnement » du tungstène par l'oxygène (3). Dans le cas du tube Standard, le foyer est porté, lors de l'évacuation, à une température voisine de celle de la fusion du tungstène. C'est la raison pour laquelle on observe souvent des cratères ou des protubérances en ce point. Au contraire, le tungstène du tube à radiateur ne peut guère dépasser la température de fusion du cuivre (1.350° K.) et l'oxyde WO^3 qu'il contient toujours en petites quantités, ne peut être totalement dissocié. Il en résulte que, lorsque le foyer est ultérieurement

(1) *Journ. of Industr. and Eng. Chem.* (février 1913).
(2) *Rev. Gen. de l'Electr.*, t. 4, p. 443 (sept. 1918) et t. 6, p. 134 (août 1919).
(3) *Gen. Electr. Rev.*, t. 18, p. 331 (1915).

porté à l'incandescence, l'oxygène résiduel se diffuse jusqu'à la surface et, en s'échappant, recouvre momentanément le métal d'une couche d'épaisseur monoatomique d'oxygène adsorbé. Ce gaz très électronégatif joue

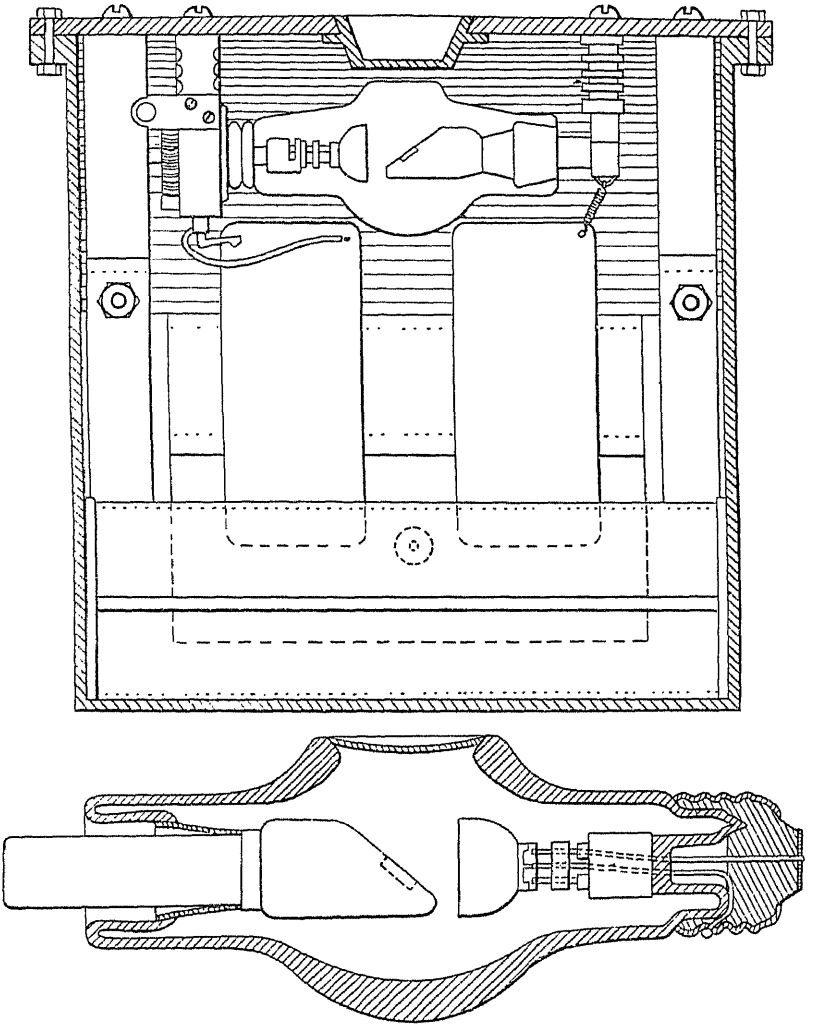


Fig. 23.

dans l'émission thermoélectronique le même rôle important qu'il joue en photoélectricité, c'est-à-dire qu'il forme une couche double dont le feuillet négatif est extérieur, si bien que le travail de sortie (1) devient supérieur

(1) $\Phi = 9{,}2$ volts pour une surface de tungstène recouverte d'un film continu d'oxygène adsorbé.

à l'énergie cinétique du corpuscule et que l'émission corpusculaire est arrêtée.

L'oxygène dégagé par le foyer a ainsi la même action sur le filament que sur le métal incandescent de l'anticathode. Langmuir a montré qu'une pression de 10^{-2} barye de ce gaz suffit à réduire à une très petite valeur l'émission électronique d'un filament de tungstène porté à 1.800° K. 15 % des molécules de O^2 rencontrant une surface de tungstène portée à 2.300° K. se fixent pour donner la couche double, qu'il ne faut pas confondre avec l'oxyde WO^3 considéré en masse et qui distille à 1.200° K. Il s'agit ici d'une mosaïque atomique en perpétuel état de dissociation et de reformation, qui subsiste jusqu'à la température de fusion du tungstène et sous de très basses pressions.

La pression d'oxygène causée par le dégagement du foyer est d'ailleurs insuffisante pour modifier les conditions électriques de la décharge — au moins sous les tensions usuelles. Sous une tension constante de l'ordre de 100 kV. on obtient les étincelles de Wood, blanches et bruyantes, suivies d'une disparition du gaz. Dès que le cuivre de l'anticathode se refroidit, il absorbe rapidement l'oxygène dégagé : la pression diminue, l'équilibre se détruit et le film recouvrant le filament se dissocie. C'est, en un mot, son étendue plus ou moins grande, suivant les valeurs de la pression et de la température, qui détermine la résistance apparemment variable de l'ampoule.

Tube immergé dans l'huile pour le radiodiagnostic. — Coolidge [1] ne s'est pas satisfait du tube à radiateur et a voulu créer un appareillage transportable encore plus réduit et évitant radicalement tout danger d'électrocution. Il a pour cela construit le petit tube représenté sur la figure 23 qui est immergé dans l'huile servant à l'isolement du transformateur lui-même. L'ensemble ne pèse pas plus de 25 kg. et peut supporter la puissance indiquée plus haut (10 m. A moy. sous 60 kV. eff.). L'ampoule, de dimensions très réduites, est construite en verre épais (6 mm.) à 50 % de plomb de manière à réduire à l'extrême le poids de la protection.

Une fenêtre circulaire en verre transparent est soudée dans sa paroi, ce qui constitue un remarquable travail de verrerie. Un cône d'ébonite, fixé sur une paroi de la cuve, déplace l'huile sur le trajet des rayons tout en assurant l'isolement de l'ampoule. Le radiateur est ici supprimé, l'huile assurant un meilleur refroidissement de l'anode que l'air. Des chambres sont prévues pour permettre la dilatation de l'huile sous pression d'air. L'élévation de température admissible est de 18° C ce qui correspond à une durée de fonctionnement à pleine charge de 10 minutes.

(1) *Am. Journ. of Röntg.*, t. 7 (avril 1920).

Coolidge a également construit un appareil de ce type qui supporte indéfiniment 40 m. A moy. sous 60 kV. eff. L'anode est alors mise au sol et refroidie par une circulation d'eau prise sur la canalisation urbaine.

Tubes à circulation d'eau. — Coolidge a cherché à accroître la puissance du tube Standard et a décrit (1) un modèle dans lequel l'anticathode était formée par un disque de tungstène de 10 cm. de diamètre. Avec un large foyer, ces tubes supportaient, dans un bain d'huile refroidi par une circulation d'eau, 50 mA moy. sous 200 kV max. mais, au bout de quelques dizaines d'heures de fonctionnement, le verre était intérieurement corrodé par l'électrolyse se produisant à chaud. Le foyer est aussi rapidement altéré, surtout par fonctionnement sur inducteur, si bien que cette solution n'est pas satisfaisante pour les puissances excédant le kilowatt.

Le seul mode rationnel d'évacuation de la chaleur consiste en vérité à refroidir l'anticathode par une circulation d'eau. La figure 24 représente un tube (2) dont l'anticathode était construite comme l'est celle du tube à radiateur, avec cette différence qu'elle était tubulaire et parcourue intérieurement par un courant d'eau arrivant jusqu'au voisinage immédiat du foyer.

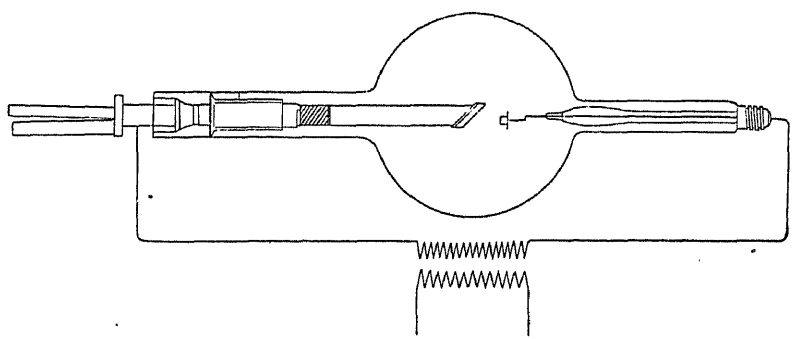


Fig. 24.

Celui-ci était constitué par une mince plaquette de tungstène cuivrée et soudée à l'argent sur l'extrémité du tube de cuivre.

L'appareil fut alimenté directement par un transformateur car il se comportait, ainsi que le tube à radiateur, comme une soupape lorsqu'il était soumis à une tension alternative.

Un tube de ce modèle supporta pendant 68 heures une intensité moyenne de 100 m. A sous une tension de crête de 70 kV. ce qui représente une puissance de 5 kw. Celle-ci put être doublée pendant quelques instants

(1) *Am. Journ. of Röntg.*, (déc. 1922).
(2) *Am. Journ. of Röntg.*, p. 881 (déc. 1915).

mais les anticathodes présentèrent des fuites au bout de ce temps.

Avec une puissance de cet ordre il faut faire circuler dans l'anticathode au moins 2 litres d'eau froide par minute pour prévenir l'ébullition. Coolidge utilisa un système isolé comprenant une pompe de circulation d'eau, un ventilateur et un réfrigérant.

Plusieurs de ces tubes ont été construits pour des usages scientifiques. Wheeler Davey (1) en a utilisé un fonctionnant normalement sous 70 kV. max. et 25 m. A moy. pour étudier l'action des rayons X sur le *tribolium confusum*.

Dans un mémoire récent. Coolidge et Moore (2) ont décrit un nouveau type d'anticathode beaucoup plus robuste : un mince disque de tungstène de 50 millimètres de diamètre est enrobé dans un disque de cuivre épais soudé à l'argent sur une spirale plane en tube de cuivre parcourue par

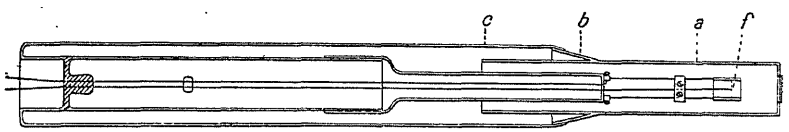


Fig. 25.

le courant d'eau. Ce dispositif est léger, mais il exige une pression d'eau assez considérable assurée par une pompe spéciale.

Avec un foyer de 3 cm. de diamètre, ces tubes ont supporté, sur un contact-tournant, 50 mA moy. sous 250 Kv. max. pendant 50 heures sans dommage. La puissance dépensée, mesurée par l'élévation de température de l'eau, était de 6,7 Kw. Le rayonnement, filtré par 1 millimètre de cuivre, était 15 fois plus intense que celui fourni par une anticathode Standard (5 mA moy., 200 Kv. max.). Ce tube est le générateur le plus puissant décrit jusqu'à ce jour et il est déjà utilisé pour la thérapie.

Il est à remarquer que les tubes à circulation d'eau ne présentent pas les phénomènes de « durcissement » que nous avons signalés dans le cas du tube à radiateur. C'est qu'ici la tubulure de cuivre demeure froide et qu'elle absorbe dès qu'il est émis l'oxygène dégagé par le foyer.

Tube métallique. — Coolidge (3) a construit un tube métallique dont le corps constituait l'anticathode et dont la cathode était isolée par une tubulure de verre.

L'expérience ayant montré qu'il était possible de construire un tube à

(1) *Journ. Exp. Zoology*, t. 22 (avril 1917).
(2) *Am. Journ. of Röngt.*, t. 10, p. 884 (nov. 1923).
(3) *Am. Journ. of Röntg.* (1917).

circulation d'eau, il suffisait de renverser le rôle de l'anode pour obtenir le tube métallique. Il y eut cependant de sérieuses difficultés à vaincre pour maintenir un vide suffisant dans l'appareil. La figure 25 en montre le schéma. L'anode se compose d'un tube de cuivre *a* portant à son extrémité une fenêtre, qui constitue une anticathode par transmission, formée par une mince feuille de platine soudée à l'argent sur le tube. Celui-ci est soudé au tube de verre *c* par l'intermédiaire du collet de platine *b*. La cathode est construite à la manière ordinaire, le filament est visible en *f*.

Le tube ne put être évacué qu'après avoir été fortement chauffé plusieurs fois de suite dans l'hydrogène. Une autre difficulté rencontrée fut que le tube de verre servant d'isolateur cathodique se chargeait négativement jusqu'au voisinage du collet de platine, par suite de l'atmosphère électronique interne et le verre était perforé par une étincelle partant du corps anodique. Cet accident fut prévenu en faisant déborder le tube de cuivre, comme l'indique la figure 25, à l'intérieur de l'appareil.

Les essais furent exécutés sans fenêtre anticathodique de platine, l'anode étant plongée dans l'eau courante. Ces tubes peuvent supporter une très haute tension et une puissance élevée lorsqu'on les laisse fonctionner sur une pompe, mais sont encore difficiles à évacuer d'une manière durable.

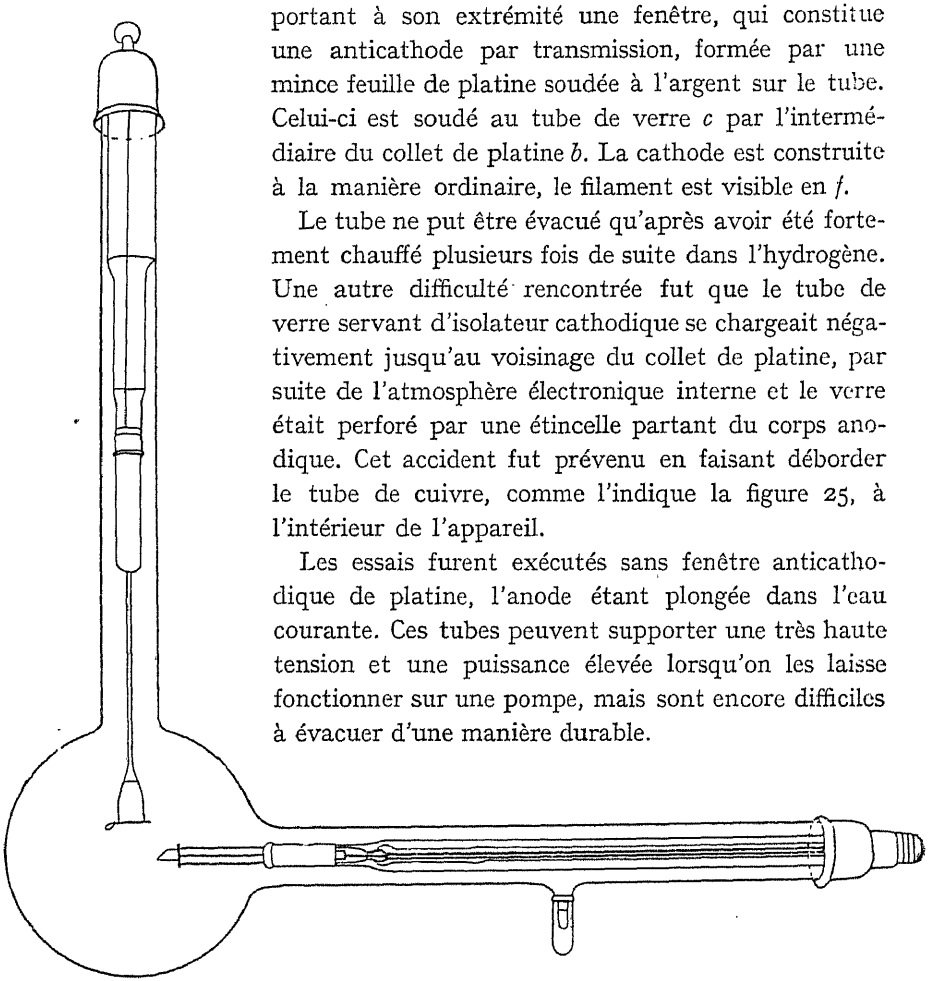


Fig. 26.

Ce mode constructif a été utilisé pour la fabrication d'un kénotron de 40 kw. fonctionnant sous 15 kV. de pliotrons de grande puissance (100 kw) et d'un magnétron de 1.000 kilowatts.

Autres tubes à cathode incandescente du type Coolidge. — Plusieurs modèles

de tubes munis de cathodes de ce type (1) ont été construits en Allemagne. Celui de l'Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft (A. E. G.) est tout à fait semblable au tube Standard et ne s'en distingue guère que par sa longueur qui atteint 80 cm. Il est destiné à la thérapie et c'est le premier tube qui ait permis l'emploi pratique de tensions de l'ordre de 200 kV.

Les tubes Siemens pour diagnostic ont été construits, soit en enrobant l'anticathode de tungstène dans une masse importante de fer, soit en utilisant le refroidissement par eau bouillante. Le premier mode constructif tend à accroître la capacité calorifique de l'anticathode, mais la température ne pouvant dépasser celle du rouge sombre, le refroidissement est très lent. L'emploi de molybdène au lieu de fer, expérimenté par Coolidge, apporte une bien meilleure solution à ce problème.

La figure 26 représente le modèle destiné à la thérapie. Les tubulures sont rectangulaires et disposées en arrière de manière à accroître la proximité du foyer et de l'objet irradié. Ce tube, qui supporte 3 m. A sous 200 kV. max., est disposé dans l'énorme boîte de plomb représentée sur la figure .... La firme Siemens et Halske a également construit un tube à grand foyer dans lequel l'anticathode est un large disque de tungstène de la dimension d'une soucoupe de grande surface rayonnante (2). Ce tube supporte une dizaine de milliampères sous 200 kV. max.

Le tube construit par la firme Müller, de Hamburg, est original et intéressant (voir fig. 27). Il possède une anticathode de platine soudée sur une tubulure de cuivre refroidie par eau bouillante ou par circulation d'eau.

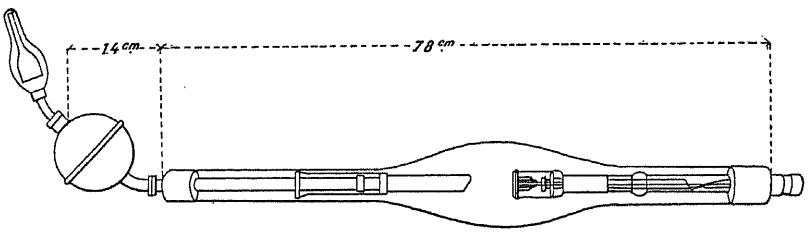


Fig. 27.

Ce mode de refroidissement a permis de réduire beaucoup le volume de l'ampoule qui a une forme ovoïde particulièrement robuste. Sa longueur approche 1 mètre. Il supporte 4 à 5 m. A moy. sous 220 kV. La cathode consiste en un filament de tungstène en V tendu à l'intérieur d'une cupule

(1) Tubes improprement désignés du nom de « Coolidge-Fürstenau ».

(2) Ce mode constructif d'anticathode rayonnante est beaucoup plus rationnel que celui usité dans le tube Standard. Il faut, pour une masse métallique donnée, offrir la plus grande surface rayonnante possible.

en aluminium obturée du côté de l'anticathode par une grille à larges mailles. La cupule est isolée du circuit du filament et n'est connectée avec lui qu'à l'extérieur de l'ampoule par l'intermédiaire d'une résistance d'une dizaine de milliers d'ohms. Nous dirons le rôle de ce dispositif lorsque nous étudierons la forme de la décharge électrique dans les tubes.

Ce tube possède la propriété remarquable de réabsorber rapidement, lorsqu'on y fait passer une *grande* intensité de courant, les gaz qu'il peut accidentellement dégager sous une pression aussi élevée qu'une dizaine de baryes. L'aluminium et le cuivre jouent un rôle essentiel dans cette absorption électrique.

Cette firme construit aussi un tube destiné au diagnostic qui présente cette particularité intéressante de posséder un foyer linéaire qui, vu en bout dans la direction d'utilisation, se comporte comme un foyer punctiforme de grand éclat.

Nature de la cathode incandescente. — Le tungstène est actuellement universellement utilisé sous forme de filaments dans les tubes à cathode incandescente du type Coolidge. Il possède en effet un point de fusion plus élevé (3.267° C) et une tension de vapeur moindre que celles des autres éléments réfractaires comme l'osmium, le tantale, le molybdène, le zirconium et le carbone qui pourraient servir à cet usage. Langmuir a déterminé l'intensité du courant d'électrons susceptible d'être émis par l'unité de surface de ces divers éléments à la température de 2.000° K. dans un vide très élevé. Il a trouvé :

TABLEAU IV

ÉLÉMENTS	MILLIAMPÈRES PAR CM^2 A 2.000° K.	CONSTANTE *b* DE RICHARDSON
Pt	0,6	85.10^3
W	3.	55
Ta	7.	50
Mo	13.	50
C	1.	32

Cet ordre ne coïncide pas avec celui que l'on obtiendrait en considérant le caractère électropositif. Mais, outre que des traces de gaz peuvent troubler ces phénomènes en modifiant l'état des surfaces, la forme cristalline du réseau peut modifier la valeur du travail de sortie de l'électron.

Nous avons réuni sur le graphique de la figure 28 un certain nombre de caractéristiques (1), relatives aux filaments de tungstène, qu'il est utile

(1) LANGMUIR, *Gen. Electr. Rev.*, t. 19, p. 208 (mars 1916) et DUSHMAN, *Gen. El. Rev.* t. 18, p. 156 (mars 1915).

de connaître. Les diamètres de ces filaments, exprimés en millimètres et en mils (unité pratique américaine valant un millième d'inch, soit 0,025 mm.) sont portés en abscisses. La courbe S. T. (safe temperature) indique les températures maxima absolues compatibles avec une vie normale, soit une durée de 2.000 heures (1). Les caractéristiques sont indiquées en fonction des diamètres pour *cette température limite*. Ce sont : l'intensité I (en ampères par

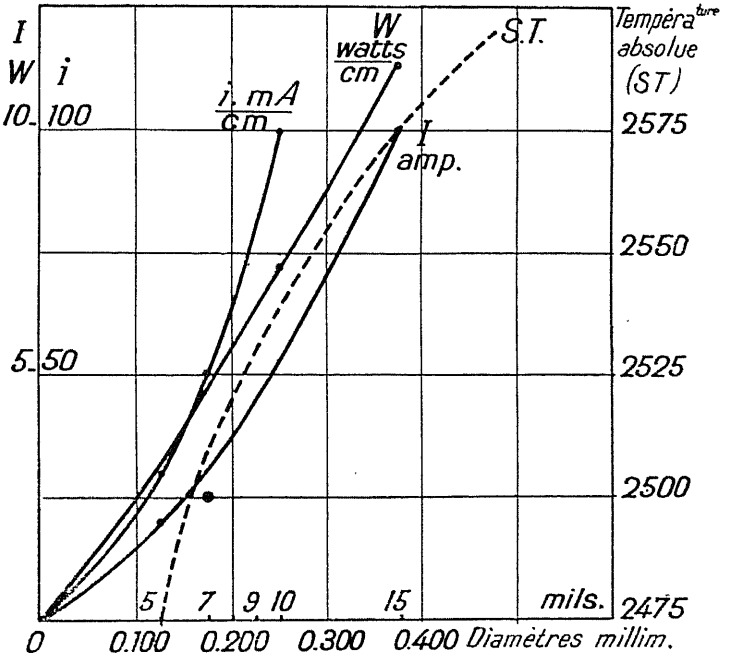


Fig. 28.

centimètre de longueur) du courant nécessaire pour atteindre cette température ; la puissance W (en watts par cm. de longueur) nécessitée par ce courant ; l'intensité i (en milliampères par cm. de longueur) du courant thermo-électronique émis dans ces conditions. Sachant que le filament du tube Coolidge est de 9 mils, on voit qu'il est imprudent d'y faire passer plus de 4,5 ampères. Il est alors porté à 2.530° K. et est capable de débiter 80 m. A par centimètre, ce qui ferait environ 500 m. A pour sa longueur totale s'il était isotherme.

On a essayé d'obtenir des courants électroniques de cette intensité à des températures moins élevées afin de diminuer l'usure du filament qui

(1) Cette « vie » normale correspond à une évaporation réduisant le diamètre de 10 %.

provient de sa volatilisation. Langmuir (1) a étudié des filaments de tungstène renfermant de la thorine (1 à 2 % ThO^2). Le thorium est plus électropositif que le tungstène, mais il est aussi plus volatil et ne peut s'employer sans support. Lorsqu'on porte à l'incandescence un filament de ce genre le thorium provenant de la dissociation de son oxyde se diffuse et, en s'évaporant, forme temporairement à la surface un film très émissif. Pour conserver cette couche monoatomique sur la surface du filament, il est nécessaire que la température ne dépasse pas 1.800° C. Le courant thermoélectronique est alors 130.000 fois plus intense qu'il ne l'est avec du tungstène pur, mais le filament est encore plus sensible à la présence d'une trace d'oxygène et il est nécessaire d'opérer en présence d'un élément très avide de ce gaz comme le magnésium. Il est probable que le celtium et le zirconium jouissent de propriétés analogues.

Langmuir et Kingdon (2) ont également étudié l'action, sur l'émission électronique du tungstène, de la vapeur de cœsium à la température ordinaire : ($p = 0{,}00166$ barye à 24° C). Un filament de tungstène, porté à la température de 900° K. en présence de cette vapeur, *adsorbe* un film monoatomique de Cs et devient susceptible d'émettre 0,3 amp./cm^2. Ce film se détruit aux températures plus élevées. Le travail de sortie de l'électron du réseau cristallin de tungstène pur est en effet mesuré par 4,5 volts alors qu'il ne dépasse pas 1,34 volt pour Cs.

L'ionisation de la vapeur de cœsium au contact d'un filament incandescent ne s'effectue que lorsque le film ne peut subsister (à 1.100° K. par exemple) et que le travail de sortie Φ de l'électron est supérieur au potentiel d'ionisation de Cs (3,9 volts). C'est le cas pour des filaments de tungstène ($\Phi = 4{,}5$ v.), de carbone ($\Phi = 4{,}1$ v.), de tantale ($\Phi = 4{,}3$ v.). Un filament de thorium (tungstène thorié : $\Phi = 3{,}0$ v.) est incapable de capturer l'électron périphérique du cœsium.

Des filaments de platine recouverts d'une mince couche d'oxydes alcalino-terreux ou simplement d'un film monomoléculaire d'un de ces éléments, — obtenu en le mettant en présence d'un oxyde chauffé sur un filament voisin, — sont utilisés comme cathodes incandescentes de pliotrons (Western Electric Co). Ces procédés recevront certainement une application importante dans la technique des rayons X si l'on parvient à protéger convenablement le filament du bombardement ionique et de l'attraction électrostatique.

(1) *Electr. Rev.*, t. 61, p. 132 (janv. 1923) et *Phys. Rev.*, t. 22, p. 357 (oct 1923).
(2) *Proc. Am. Phys. Soc.* (déc. 1922).

3. Tube métallique Philips. — La Société Philips a construit récemment un tube métallique à cathode incandescente (tube Métalix) qui se différencie nettement du tube Coolidge et qui est représenté sur la figure 29. Il consiste essentiellement en un récipient cylindrique en ferro-chrôme 1 contenant un filament circulaire, 2 dont la sortie isolée 3 est soudée dans la coupe de verre 4 directement soudée aux corps 1. Un diaphragme 5 débouchant juste devant l'anticathode 6 obture cette « boîte à électrons » préférablement mise au sol. L'anticathode est isolée par le col de verre 7, la soudure extérieure verre-ferro-chrôme étant protégée par le tube de garde 8 qui prévient la diffusion des électrons dans l'isolateur anodique.

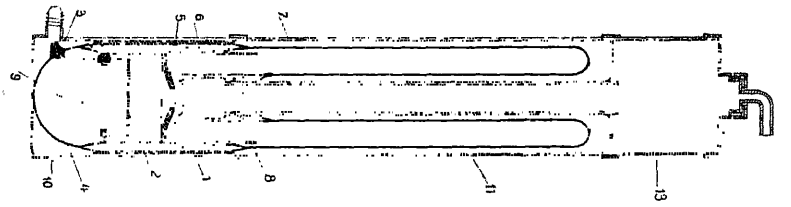


Fig. 29.

Les rayons sont utilisés suivant la direction 9. Les parties en verre sont protégées par des manchons (métallique 10 et isolant 11) qui font de cet appareil le premier tube métallique réellement robuste et pratique mis sur le marché. Le modèle dentaire supporte 15 mA moy. pendant 20 secondes sous 50 KV eff. Le modèle radiographique admettrait 75 mA sous 100 KV. Un tube pour la thérapie est à l'étude. Une particularité intéressante de cet appareil réside en ce qu'il peut fonctionner même sous une pression de plusieurs dizaines de baryes d'hydrogène ou d'hélium (par suite de la grande proximité des électrodes qui l'empêche de fonctionner comme tube à gaz). Cette propriété fait que l'on pourrait y utiliser un filament au thorium ou au césium en présence d'une atmosphère convenable. Cette cathode échappe ainsi aux spécifications relatives à celle de Coolidge.

4. Le tube Lilienfeld. — Ce tube à pure émission électronique est très différent du tube Coolidge et a été réalisé indépendamment, bien que sa description (1) soit postérieure.

C'est une application d'un mode particulier de décharge électronique, découvert par Lilienfeld, dans les très hauts vides et dans des tubes de verre de forme cylindrique longs et étroits, munis d'une cathode incandescente de tungstène ou de tantale.

(1) *Königl. Sächs. Ges. Wiss. Leipzig, Math. Kl.*, t. 66, p. 576 (1914).

Dans un travail récent de Lilienfeld (1) la conductibilité de ces tubes a été déterminée, non plus par des mesures effectuées au moyen de sondes, comme dans les premières expériences, mais par la méthode dite « par différence », en mesurant successivement les potentiels acquis par deux anodes placées à des distances variables de la cathode, dans une ou plusieurs tubulures cylindriques rayonnantes de 1 à 2 cm. de diamètre.

Trois modèles de tubes ont été construits et étudiés ; le premier était muni d'une anode déplaçable le long de deux rails ; le second comportait trois tubulures identiques disposées en étoile dans chacune desquelles se trouvait une anode fixe, plus ou moins éloignée du ballon contenant la cathode. Le troisième avait une première anode fixe placée au fond d'une unique tubulure ; une seconde, mobile dans l'appareil, pouvait être accrochée à une électrode voisine de l'entrée. Toutes ces anodes étaient isolées par des pièces de quartz et toutes les parties de ces appareils étaient purgées à haute température des gaz occlus, si bien, qu'une fois séparés de la pompe, ils conservaient le vide le plus élevé qu'il est aujourd'hui possible d'atteindre et de maintenir.

Les caractéristiques de ces tubes ont été déterminées par l'application d'une tension constante atteignant 10.000 volts produite par des dynamos. Lilienfeld a d'abord observé une distribution linéaire du potentiel le long de l'axe des tubes cylindriques lorsqu'on maintenait l'intensité constante. Les longueurs des trajets étudiés ont atteint près de 80 cm. Cette forme de décharge rappelle étroitement celle qui se produit dans un conducteur métallique de section constante parcouru par un courant. La résistance du système se manifeste par un échauffement de la paroi de verre.

Lilienfeld a mesuré au moyen de thermo-éléments la température d'équilibre des anodes pour diverses longueurs du chemin de décharge lorsque l'intensité était maintenue constante. Il a trouvé que cette température demeurait sensiblement invariable. Par exemple, lorsque la longueur du trajet augmentait de 20 cm., un courant de 10 m. A, qui correspondait à une dépense de puissance d'environ 20 watts à l'anode, provoquait une dépense à peu près équivalente dans la paroi de verre, le potentiel de l'anode s'étant accru de 2.000 à 4.000 volts.

Lilienfeld a ensuite étudié avec ces 3 modèles de tubes, la loi de variation de l'intensité du courant en fonction de la tension. On sait qu'il avait observé autrefois une loi en V^2 et que ses résultats avaient d'abord été interprétés par Langmuir comme dénotant un vide insuffisant. Cette interprétation ne saurait être maintenue après les observations suivantes. Le premier tube a donné l'exposant 1,72, le second de 1,57 à 1,86 et le troisième 2,0. De plus, une soupape à cathode incandescente (comportant deux anodes planes, circulaires, disposées dans un ballon, de part et d'autre du plan du filament), a donné, avec un degré de vide relativement faible, la valeur 1,48 coïncidant bien avec la valeur 3/2 qui, d'après Langmuir caractérise la pure décharge électronique dans un très bon vide. Après d'autres pompages, l'exposant prit toutes sortes de valeurs comprises entre 1,31 et 1,66. Lilienfeld en a conclu : 1° que la loi en 3/2 ne saurait caractériser un vide élevé pour lequel les phénomènes ne changent plus lorsque la pression diminue ultérieurement ; 2° qu'il n'y a pas de charge néga-

(1) *Ann. der Phys.*, t. 61, p. 221 (février 1920).

tive de l'espace. Il a fait aussi des expériences démontrant que les meilleurs isolants connus : le quartz, le verre refroidi par l'air liquide, étaient incapables, dans un vide très élevé, de se charger à un potentiel négatif d'équilibre lorsqu'ils étaient bombardés par des électrons.

Un tube Lilienfeld dans lequel l'anticathode métallique était remplacée par une pièce de quartz montrait que cette électrode pouvait être portée, par bombardement électronique, à telle température que l'on désirait en produisant une décharge dans le circuit d'allumage. Cette expérience prouve que le potentiel d'équilibre du quartz pouvait devenir fortement positif. Lilienfeld s'élève contre l'hypothèse de Coolidge d'après laquelle ce serait la charge négative du verre qui, dans les tubes de ce dernier, empêcherait le bombardement de la paroi et la fluorescence verte. Il prétend que, dans les tubes à cathode incandescente, le verre fluoresce en bleu lorsqu'il est bombardé par des électrons. Il est enfin obligé d'admettre l'existence « d'électrons positifs » pour expliquer les résultats observés.

Il semble certain que les expériences de Lilienfeld aient été excutées dans un vide très élevé, mais on peut les expliquer, contrairement à son opinion, en admettant la présence d'une charge négative de l'espace et en tenant compte du rôle prépondérant joué par les parois de verre. Celles-ci, lorsqu'elles sont bombardées par des électrons possédant une vitesse suffisante, deviennent la source d'électrons secondaires doués de faibles vitesses mais dont le nombre peut être beaucoup plus grand que celui des corpuscules primaires.

Langmuir a montré (1) que la loi de décharge avec l'exposant 3/2 n'est valable que lorsque les parois de verre ne jouent aucun rôle dans la décharge. Autrement le phénomène se complique du fait de l'émission d'électrons secondaires et la conductibilité peut être accrue jusqu'au point ou s'observe la loi en V^2. On conçoit que toutes les valeurs intermédiaires puissent être observées suivant l'importance du rôle des parois. L'un ou l'autre type de décharge peut être obtenu suivant la manière dont on applique le potentiel positif à l'anode, progressivement ou brusquement. L'auteur a observé autrefois ce phénomène en alimentant un tube Coolidge sur une batterie d'accumulateurs de 1.000 volts et, cependant, la distance des parois de verre aux électrodes est, dans ce tube, 3 ou 4 fois plus grande que celle des électrodes. La cathode étant *préalablement allumée* on observait, en fermant l'interrupteur, soit l'un des régimes, soit l'autre, avec une égale probabilité, chacun d'eux étant stable une fois établi. On obtenait par exemple, sous 870 volts, soit un courant de 5,2 milliampères, soit un de 9,4 m. A, c'est-à-dire presque le double. Le phénomène n'apparaissait qu'au-dessus de 500 volts. Les caractéristiques statiques des deux formes

(1) *Gen. Electric Review*. t. 23, p 589 (juillet 1920).

de décharge furent tracées pour différentes températures constantes du filament. La première donnait un exposant de V égal à l'unité. L'intensité était proportionnelle à la tension et l'on se trouvait dans la partie rectiligne de transition des caractéristiques de Langmuir en $V^{3/2}$. La seconde

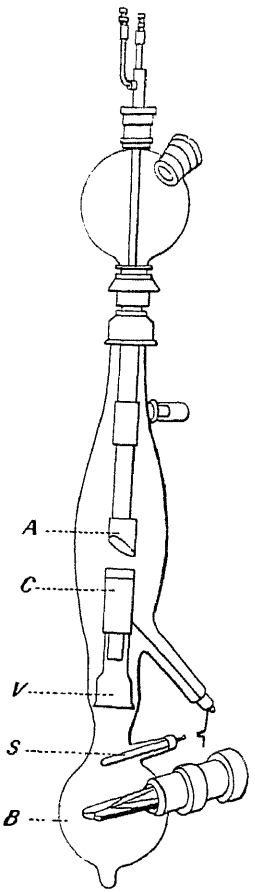


Fig. 30.

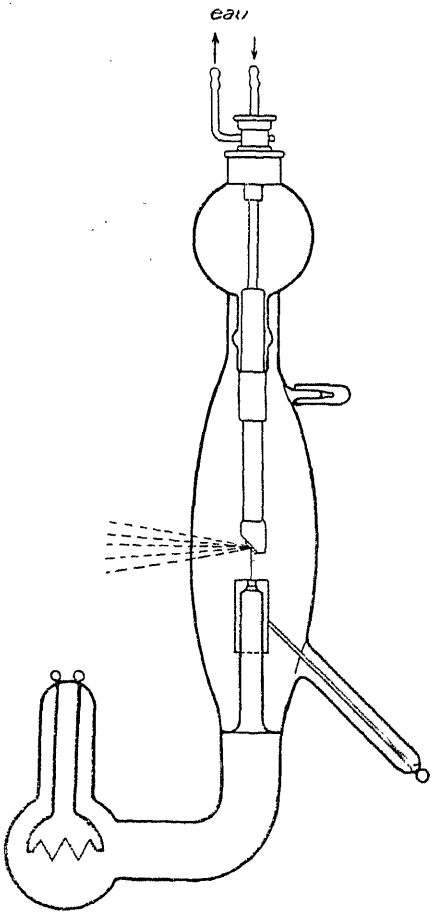


Fig. 31.

donnait la caractéristique en V^2 de Lilienfeld et correspondait sans doute à l'intervention des parois.

L'expérience de Lilienfeld sur la soupape à deux anodes ne saurait non plus, pour la même raison, infirmer les résultats de Langmuir, la distance du filament à la paroi n'étant guère plus grande que celle du filament à chaque anode. Cette opinion est confirmée par le fait que l'emploi d'une

seule anode — l'autre étant isolée — conduisait à une caractéristique très différente (exposant 1,31). L'expérience sur le tube à anticathode de quartz doit, à notre avis, s'expliquer exactement de la même manière : le quartz se comportant comme le fait le verre et devenant la source d'électrons secondaires revenant sur la cathode percée. Si le nombre de ceux-ci est supérieur à celui des premiers, le quartz se charge positivement et la décharge se maintient.

Il est peu probable que la paroi de verre des tubes Coolidge ne puisse se charger négativement, mais l'existence de la charge de l'espace suffit à

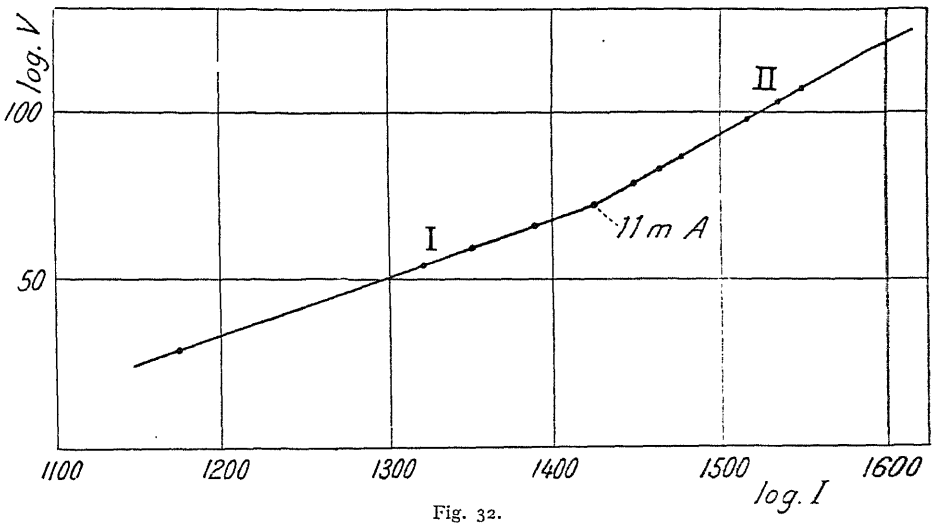


Fig. 32.

expliquer l'absence du bombardement du verre, les électrons secondaires retournant vers l'anticathode. Au point de vue de la fluorescence du verre dans un vide élevé sous l'influence d'un bombardement électronique, on observe sous la même pression, soit une fluorescence bleue, soit une fluorescence verte. Les couleurs correspondantes sont inversées dans le cas du quartz. Il semble que lorsque la vitesse des électrons est faible, on obtienne la première alors que lorsqu'elle est élevée on observe la seconde.

Le tube Lilienfeld technique se compose d'un ballon B (voir fig. 30) contenant un fort filament de tungstène en forme de W, chauffé à une température *constante* élevée (courant de 13 ampères sous 5 volts) au moyen d'une batterie ou d'un transformateur. Une cathode concave en aluminium C, percée d'un trou et supportée par un tube de verre V, est disposée, comme dans un tube à gaz, en face d'une anticathode A identique à celle que nous avons décrite à propos du tube Müller et permettant

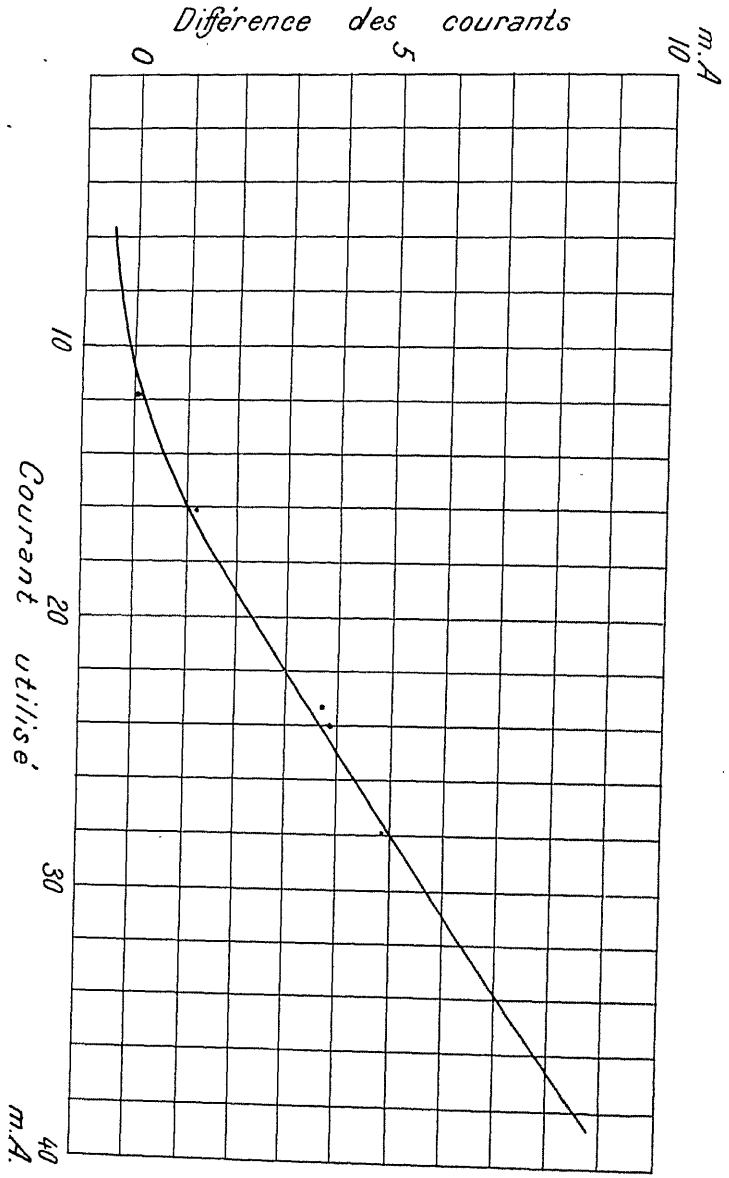

Différence des courants
0
5
10
m.A
Courant utilisé
10
20
30
40
m.A.

Fig. 33.

l'usage d'une ampoule ovoïde de faible diamètre. Enfin une électrode isolée ou « sonde » S, en forme de tige ou d'anneau, est disposée entre le filament et la cathode percée.

Le circuit de décharge du type Lilienfeld est ici constitué par le filament, le tube de verre V et la cathode percée. Il peut avoir une longueur ou une forme quelconque, telle que celle représentée sur la figure 31. Ce modèle a été construit en vue d'éviter l'illumination du foyer par le filament afin de permettre l'étude spectrographique de la pâle lumière bleue qu'il émet.

Ce circuit exige pour fonctionner l'application, entre le filament et la cathode C, d'une différence de potentiel, constante ou variable, de quelques milliers de volts. Cette tension est prise, soit par un dispositif potentiométrique sur la tension principale servant à produire les rayons X (voir fig. 74) — tension appliquée entre les deux électrodes principales C et A — soit au moyen d'un petit transformateur auxiliaire dont un autre enroulement porte en même temps le filament à l'incandescence (voir fig. 82). La caractéristique de ce circuit, relevée sous tension constante, est représentée en coordonnées logarithmiques sur la figure 32 (1).

Elle se compose de deux parties rectilignes, la première I, qui correspond aux courants inférieurs à 11 m. A, a une pente donnant à V l'exposant 2,85. La seconde II lui attribue la puissance 1,88 voisine de 2. En aucun cas la loi en $V^{3/2}$ n'est vérifiée et ce phénomène n'est pas dû à la présence de gaz car l'effet soupape du tube est parfait et il ne présente pas de fluorescence verte caractéristique.

L'existence des deux régimes dépend du rapport qui existe entre les intensités du courant d' « allumage », entretenu entre le filament et la cathode percée, et du courant utilisé, circulant entre cette dernière et l'anticathode. Le canal dont est perforé la cathode joue un rôle important — analogue à celui de la paroi de verre — pour l'émission des derniers corpuscules qui vont déboucher dans le champ appliqué entre C et A et ce rapport dépend de la nature et des dimensions du canal. La figure 33 représente les variations du courant utilisé, porté en abcisses, en fonction des différences des deux courants. On voit que, lorsque le premier est de 11 m. A, le courant d'allumage a la même intensité et que, lorsqu'on fait arriver de plus grandes intensités sur l'anticathode, le courant d'allumage excède de plusieurs milliampères le courant utile.

Ce diagramme a été obtenu en excitant le circuit d'allumage au moyen d'un dispositif potentiométrique simple, c'est-à-dire en reliant l'anticathode et le filament aux deux bornes d'une source de courant polarisée,

(1) *Ann. der Phys.*, t. 4 (août 1919).

la cathode percée étant connectée à l'anticathode à travers une résistance de 30 mégohms. On ne pourrait donc pas, avec ce montage, faire passer moins de 11 m. A dans le tube. Pour obtenir les régimes d'intensité moindre on shunte le circuit filament — cathode percée au moyen d'une résistance variable *b* de l'ordre du mégohm (voir fig. 74).

Le rôle de la sonde S est de faciliter le passage de la décharge aux régimes élevés. A cet effet, elle est portée à un potentiel positif par rapport à celui du filament en la reliant à la cathode percée par l'intermédiaire d'une résistance de quelques centaines de milliers d'ohms. Elle est analogue à la grille d'une triode, la plaque étant constituée par la cathode percée.

Comme on le voit, l'intensité du faisceau cathodique et sa vitesse sont aussi indépendants dans le tube Lilienfeld qu'ils le sont dans le tube Coolidge. L'intensité et la qualité des rayons X peuvent se modifier indépendamment, la première en réglant le champ électrique appliqué au circuit l'allumage, la seconde en réglant celui appliqué au circuit principal.

Le circuit d'allumage, qui sert à projeter un flux d'électrons par l'orifice le la cathode creuse, ressemble en quelque sorte au long col incurvé de a pompe à condensation de Langmuir qui, lui, sert à produire un jet natériel d'atomes de mercure. Il y a une certaine analogie entre le débit lectronique et le débit moléculaire de ces deux « conducteurs » car la paroi joue, dans les deux, un rôle analogue. Mais les électrons qui débouchent e la cathode percée ne peuvent pas se diffuser dans toutes les directions i surtout latéralement, comme le font les atomes de mercure s'échappant 'un tube abducteur, car ils se trouvent dans un champ électrique intense.

La forme du faisceau cathodique est facile à prévoir d'après celle u trou, dont les bords constituent la source électronique ultime, et celle e la face active de la cathode. Avec un canal circulaire et une cathode oncave, c'est un cylindre creux donnant un foyer annulaire.

La dimension de celui-ci peut être réglée électrostatiquement en disposnt entre les deux électrodes un anneau métallique isolé qui, s'il est porté un potentiel positif par rapport à la cathode, élargira le faisceau cathodique (il n'y a pas d'ions et par suite pas de chute cathodique et le gradient du champ est uniforme entre les deux électrodes) et qui, s'il est égatif, réduira le diamètre du faisceau cathodique.

Il est possible de faire passer dans le tube Lilienfeld pendant un temps sez court des débits de l'ordre de cent milliampères. Il semble aussi u'il soit possible d'atteindre de très hautes tensions avec ce dispositif r le filament et le circuit d'allumage sont bien protégés de l'action u champ principal. Les tubes actuels ont une longueur ne permettant s de dépasser 150 kV. max. Ils supportent, sous cette tension, une puis-

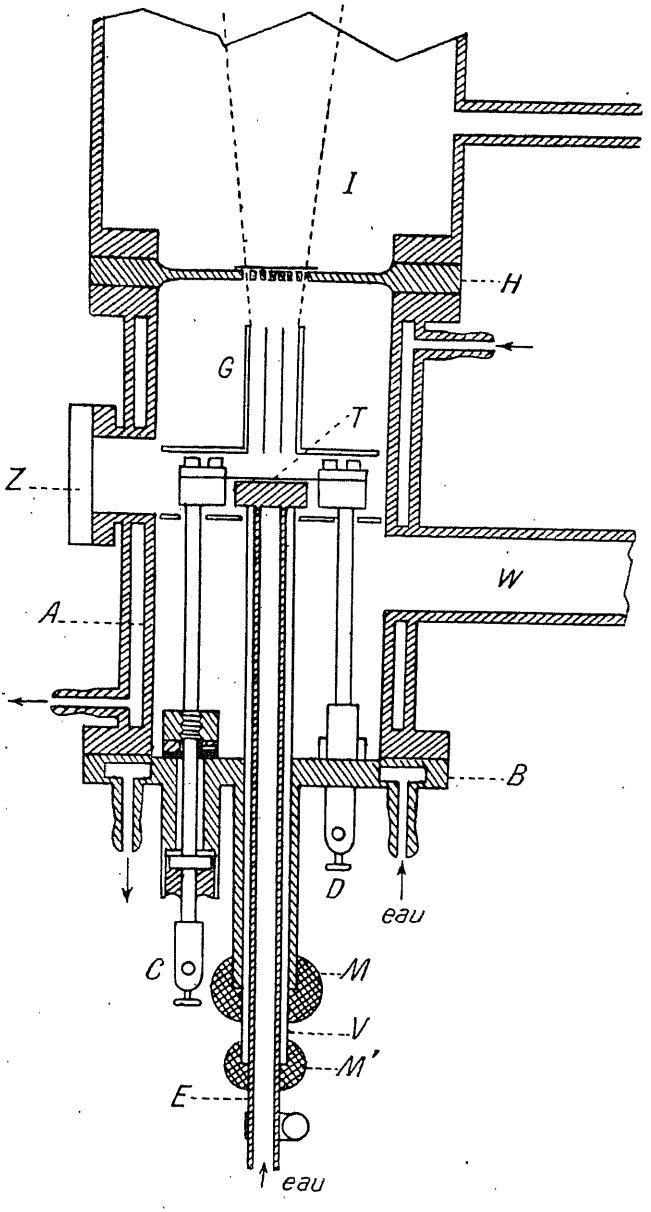


Fig. 34.

sance voisine d'un kilowatt avec leur circulation d'eau anticathodique (pompe de la figure 10). Nous ignorons si l'immersion dans l'huile troublerait le fonctionnement du circuit d'allumage en dispersant la charge des parois.

Nous décrirons ultérieurement, en étudiant la forme de la décharge dans les tubes, les divers montages propres à faire fonctionner le tube Lilienfeld.

Il est à remarquer que la cathode incandescente de ce tube pourrait être remplacée par un arc à vapeur de mercure, celle-ci étant utilisée, comme dans une pompe à condensation, pour entretenir un vide élevé dans le compartiment cathode percée-anticathode. Les ions positifs seraient repoussés par la cathode percée, tandis que les électrons seraient draînés par cette électrode, vers l'anticathode.

5. Tubes de laboratoire. — De très nombreux tubes de laboratoire à cathode incandescente ont été construits, aussi nous bornerons-nous dans cet exposé à en décrire quelques-uns pris à titre d'exemple des diverses techniques proposées.

Pour les faibles tensions (jusqu'à 1.200 volts) Holweck (1) a construit un petit tube métallique (voir fig. 34) d'un emploi très pratique. Il se compose d'un cylindre en laiton étamé A porteur d'une chemise d'eau réfrigérante, évacué par la tubulure W et muni d'un regard L fermé par un disque de verre dont les bords rodés et graissés sont simplement appliqués par la pression atmosphérique sur une collerette portée par le cylindre. Le fond de celui-ci est obturé de la même manière par un disque de bronze B qui supporte les deux électrodes et est refroidi par une circulation d'eau.

L'une des bornes cathodiques D est à la masse, l'autre C est isolée et mastiquée. Le filament linéaire T de tungstène ou de carbone est légèrement tendu entre deux pinces à vis. L'anticathode axiale de cuivre E est isolée par le tube de verre V et refroidie par une circulation d'eau isolée. Elle est mastiquée en M et M'. Le cylindre est obturé, à sa partie supérieure, par un disque de bronze H, rodé et graissé, simplement posé sur une collerette. La partie centrale du disque est perforée de petits canaux d'environ 1 mm. de diamètre. Elle supporte la fenêtre transparente qui est constituée par une feuille de celluloïd d'une épaisseur de l'ordre de 10^{-3} cm. imperméable aux gaz sauf à la vapeur d'eau. Cette feuille, collée sur la grille de soutien, supporte une pression extérieure maxima de 5 cm. de mer-

(1) *Ann. de Phys.*, t. 17, p. 5 (1922).

cure que ne doit donc pas dépasser le gaz contenu dans la chambre d'ionisation I raccordée à l'appareil suivant le même procédé.

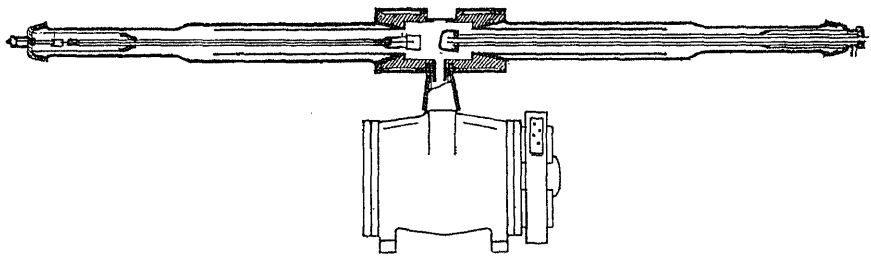


Fig. 35.

Il est à remarquer que le filament est tendu très près de l'anode (à environ 1 mm.). Cette disposition est nécessaire lorsque le champ est très faible

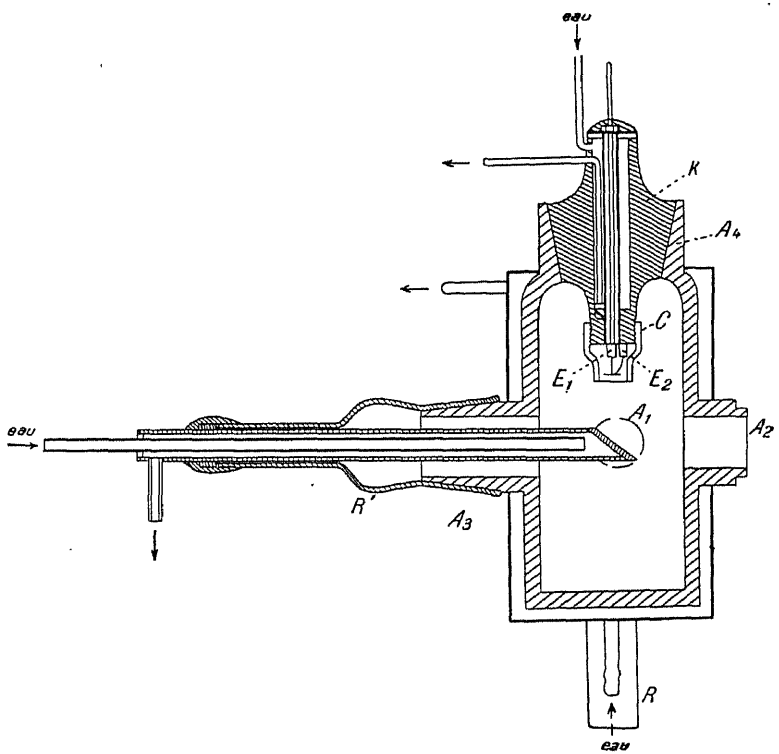


Fig. 36.

afin que l'intensité du courant ne soit pas trop limitée par la charge négative de l'espace. Elle est ici permise parce que l'attraction exercée par l'anode

est faible. Des précautions sont prises (écrans et canalisateur tubulaire G) pour que la lumière émise par le filament et les particules provenant de son évaporation ne puissent atteindre la fenêtre transparente. L'appareil est évacué par la pompe moléculaire d'Holweck qui constitue un perfectionnement important de la pompe moléculaire Gaëde. Holweck est parvenu à construire un tube assez étanche pour que la pression, après séparation de la pompe, n'y monte pas de plus d'une barye à l'heure. La pompe fonctionnait continuellement pendant l'utilisation du tube et la pression était inférieure à un dixième de barye.

Depuis, Holweck a beaucoup perfectionné sa technique en remplaçant les joints mastiqués et graissés par des presse-étoupe garnis de caoutchouc qui supportent une élévation de température approchant 100° C.

Il a également construit un tube [1] à cathode Coolidge, du type Zehnder, (voy. fig. 35) susceptible de supporter 200 Kv. max. grâce à l'utilisation du système de tube de garde décrit page 65.

Ce tube, continuellement évacué par la pompe moléculaire, admet une dizaine de milliampères sur bobine, après une formation convenable, grâce au refroidissement de son anticathode par une circulation d'eau isolée. Une autre circulation d'eau, au sol, refroidit le corps métallique de l'appareil. Une mince feuille de cuivre ou de zinc sert de fenêtre semi-transparente.

Tubes pour la spectrographie de haute fréquence. — M. Siegbahn [2] a décrit un tube à cathode Coolidge représenté sur la figure 36.

Ce tube est construit en laiton et est refroidi par une chemise d'eau. Il porte cinq tubulures dont trois sont rodées : l'une A_1, postérieure au plan de

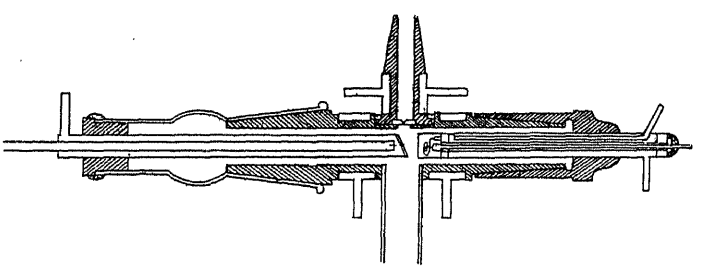


Fig. 37.

la figure, est reliée par le tube R, à la pompe moléculaire. La seconde A_2 l'est au spectrographe à vide ; A_3 reçoit le tube de verre R_2 supportant

(1) *Bull. Soc. Rad.* (déc. 1923).
(2) *Ann. der Phys.*, t. 59, p. 56 (1919) et *Phil. Mag.*, t. 37, p. 601 (1919).

l'anticathode de cuivre isolée, mastiquée, et refroidie par une circulation d'eau. Le rodage A_1 réunit le bouchon rodé K supportant la cathode qui se compose d'un filament spiralé de Coolidge fixé par les serre-fils à vis E_1 et E_2. L'un est à la masse tandis que l'autre est porté par une tige de fer isolée au mica dans un tube refroidi par circulation d'eau et faisant corps

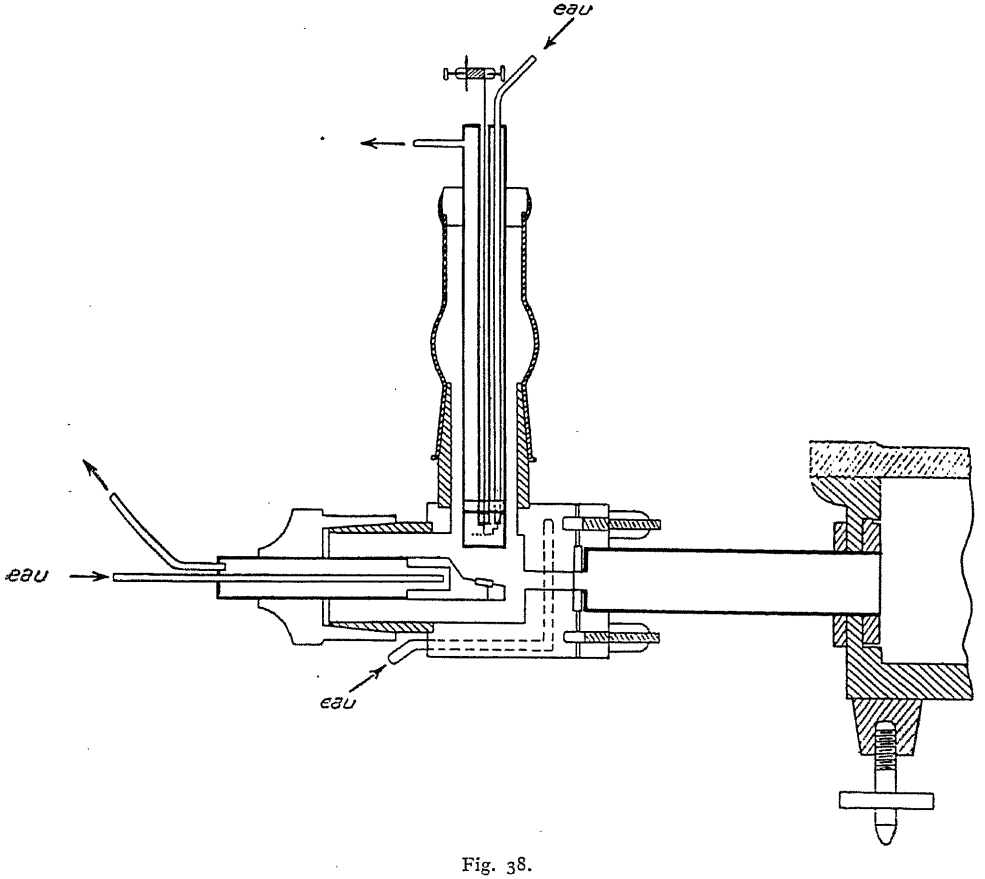


Fig. 38.

avec le bouchon. L'étanchéité de cette traversée est obtenue en la recouvrant de picéine (1). La pièce cathodique de concentration est le cylindre de fer C, dont la position peut être réglée en le vissant sur l'extrémité filetée du cône. La figure 37 montre une autre disposition des électrodes.

La figure 38 représente un autre tube de ce genre dû à Lindh et égale-

(1) Cette précieuse substance, de beaucoup supérieure à toutes les autres cires et mastics, a été décrite par WALTER (*Ann. der Phys.*, t. 18, p. 860, 1905).

ment construit à l'Institut de Physique de Lund. Il ne se distingue guère des précédents qu'en ce que la cathode y est isolée et l'anticathode mise à la masse. Les deux électrodes et le corps sont toujours refroidis à l'eau courante. Le tube est séparé du spectrographe à vide par une fente très fine servant de fente collimatrice et obturée, soit par une feuille d'aluminium de quelques millièmes de millimètre d'épaisseur, soit par une très mince feuille de baudruche analogue à celles qu'emploient les batteurs d'or (Goldschlägerhaut, Goldbeater's skin) colorée à l'érythrosine pour éviter l'entrée de lumière actinique dans le spectrographe. Ces feuilles sont appliquées sur les joues de la fente par une plaquette enduite de caoutchouc et fixée par des vis.

Les tubes de Siegbahn fonctionnent sur courant alternatif en utilisant l'une des alternances. La pompe moléculaire permet d'atteindre un vide suffisant au bout d'environ dix minutes. Ils peuvent admettre une intensité de courant permanente atteignant 100 milliampères, mais ne supportent guère plus de 30 kV. max. On peut y dépenser une puissance de l'ordre du kilowatt.

Il serait très avantageux de remplacer dans les tubes métalliques de ce genre les isolateurs de verre, de quartz ou de porcelaine, fragiles et coûteux par suite de leurs rodages, par des manchons faits d'une substance organique telle que la bakélite. On réaliserait ainsi un appareil complètement incassable.

La principale difficulté que l'on rencontre avec ces tubes réside en ce qu'il est difficile d'y faire passer une grande intensité de courant sous une faible tension, à cause de la charge spatiale. Or, la tension est souvent limitée par des conditions de voltage critique d'apparition de raies qu'il ne faut pas dépasser. Par exemple sous 5.400 v. max., l'intensité moyenne est limitée à une dizaine de milliampères. Un artifice consiste à augmenter assez la pression du gaz résiduel pour produire des ions positifs neutralisant la charge de l'espace. On peut ainsi accroître l'intensité, sous la tension indiquée, de 10 à 50 m. A. Cependant le régime devient instable, le foyer se déplace et le filament s'use rapidement, sans doute par pulvérisation, si bien qu'il faut le remplacer au bout de quelques heures de fonctionnement.

Les tubes métalliques ne supportent pas aisément de très hautes tensions. Ils sont parfois difficiles à rendre parfaitement étanches et leurs fuites ne peuvent être localisées par le « procédé de l'étincelle ». Leur fonctionnement ne peut se contrôler visuellement et l'on retrouve toujours sur les clichés les raies des métaux dont ils sont constitués. Ils ont l'avantage de la solidité.

L'auteur (1) a étudié un appareillage en silice transparente qui fonctionne depuis plusieurs années déjà en donnant toute satisfaction. Il est représenté sur la figure 39.

Le tube a été construit en quartz de manière à offrir un excellent isolement tout en ayant des dimensions très réduites et à permettre des dif

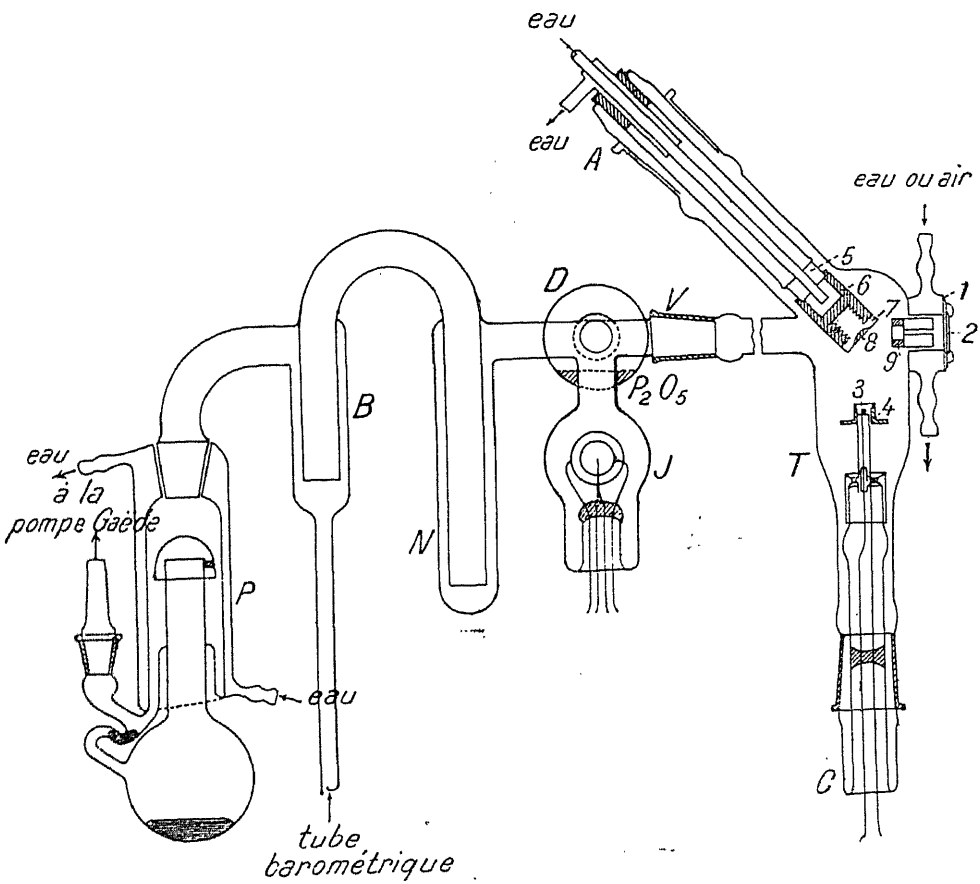


Fig. 39.

férences de température élevées en des points voisins de son enveloppe. Cette construction a aussi l'avantage d'offrir immédiatement l'étanchéité absolue, de réduire le dégagement gazeux des parois, de n'introduire aucune impureté dans les spectres, le tube pouvant au besoin être lavé

(1) *C. R.*, t. 172, p. 915 (avr. 1921). *Journal de Physique e le Radium*, t. 3, p. 154 et 221 (mai et juillet 1922).

aux acides après chaque expérience. La réparation et les transformations en sont enfin des plus faciles.

Ce tube porte quatre tubulures dont trois sont munies de rodages. La quatrième est à double paroi, de manière à permettre la circulation d'un fluide réfrigérant (air ou eau). Elle est obturée par une face plane rodée 1.

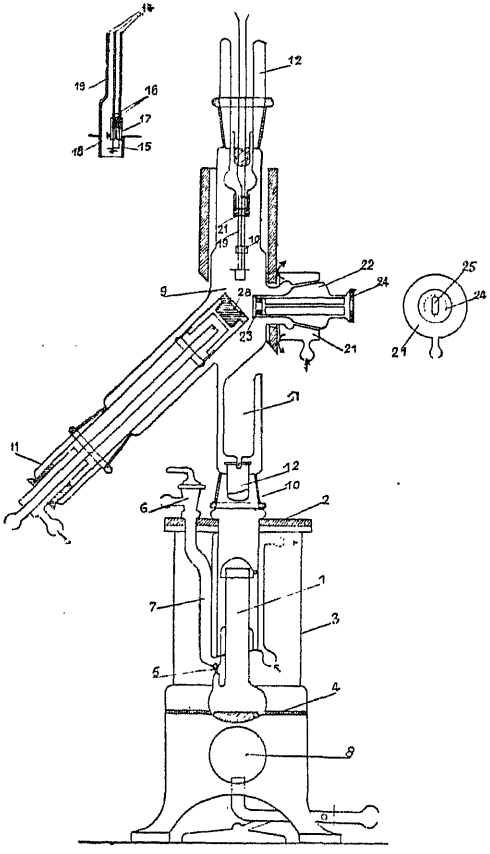


Fig. 40.

percée d'une fente (2 × 15 mm.) sur laquelle s'applique la fenêtre transparente 2. Celle-ci se compose, lorsqu'elle doit supporter la pression atmosphérique, d'une feuille de mica de 0,02 mm. d'épaisseur ou mieux de cellophane de 0,12 mm. mastiquée à la picéine. Un autre modèle, destiné à fonctionner sur un spectrographe à vide ou une boîte à analyse magnétique de rayons corpusculaires, porte une collerette de quartz s'adaptant sur le récepteur. La fenêtre est alors une feuille de cellophane noire de 0,02 mm. d'épaisseur. La tubulure intérieure porte la fente collimatrice, ordinairement

de fer et constituée par deux demi-disques 9 séparés par des cales d'épaisseur variable et fixés chacun à un demi-cylindre en acier faisant ressort dans la tubulure. Cette fente peut être très rapprochée du foyer. Elle est isolée électriquement et prend automatiquement le potentiel de la cathode à la suite de son bombardement initial par les rayons cathodiques diffusés par le foyer. Elle a l'avantage de protéger la fenêtre transparente des radiations issues du foyer et peut être à cet effet recouverte d'une feuille d'aluminium de quelques millièmes de millimètre d'épaisseur.

La tubulure T reçoit la verrerie de cathode C qui ne diffère de celle des

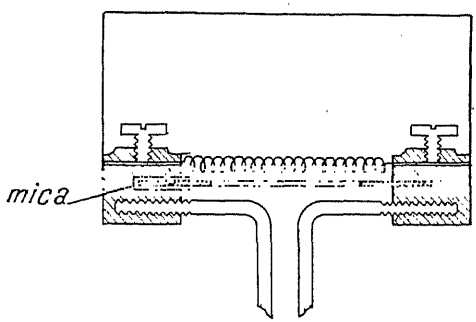


Fig. 41.

tubes Coolidge qu'en ce que toutes ses pièces sont interchangeables de manière à pouvoir modifier la nature des métaux (fer, cuivre, molybdène) entrant dans sa construction. Elle se compose d'un bouchon de verre rodé raccordé à un tube dans lequel sont soudés deux fils de Dumet (1) et qui porte un capuchon métallique faisant ressort sur son extrémité. C'est ce tube métallique qui reçoit la cathode proprement dite dont nous employons deux modèles.

L'un, donnant un foyer punctiforme, est représenté sur la figure 40 qui montre un accouplement plus compact de la pompe et du tube. Il utilise es spirales du type Coolidge qui peuvent être de tungstène, de molybdène ou de tantale et qui se montent au moyen de serre-fils en fer à vis. La concentration est réglée en modifiant la hauteur de la cupule.

L'autre (voir fig. 41) est destiné à fournir un foyer linéaire sur les substances telles que les oxydes ou les sels fusibles qui ne supportent qu'une très faible puissance par unité de surface. Il se compose d'un angle dièdre, ouant le rôle de pièce de concentration, dans l'arête duquel est fixé un filament qui peut être un boudin de 1 à 2 mm. de diamètre ou un filament

(1) Ce montage rigoureusement étanche évite les scellements et la circulation d'eau qu'ils exigent.

droit d'oxydes ou de carbone. Le diamètre du filament n'influe pas sur la largeur du foyer. Il est nécessaire que la hauteur et l'écartement des faces du dièdre soient très exactement réglées pour obtenir un foyer ayant par exemple 1 mm. sur 10 mm. Celui-ci peut être vérifié par la radiographie effectuée à travers un trou, la fente étant ôtée. L'obtention d'un foyer fin dans le plan de la fente exige souvent une concentration très intense qui limite le courant pouvant être fourni par le filament à quelques milliampères, mais cette intensité est toujours suffisante avec les substances exigeant ce dispositif.

La tubulure de quartz A (fig. 39) reçoit la verrerie d'anticathode. Celle-ci se compose d'un bouchon de verre rôdé raccordé à un tube portant un collet de platine 5 soudé à une tubulure 6 en cuivre électrolytique, refroidie par une circulation d'eau, dont la partie inférieure, massive, comporte une cavité filetée, destinée à recevoir les bouchons métalliques interchangeables 7 porteurs des divers éléments étudiés 8. Dans certains cas (Cu, Ag, Fe, ferro-alliages, etc.) le bouchon peut être pris dans la masse du métal préalablement fondu dans le vide. Dans celui d'éléments moins conducteurs, réfractaires et plus denses que le cuivre fondu (Ru, Os, Mo, Ta, W, U, Nb, Th, etc.) il suffit de fondre dans le vide, dans un creuset de quartz, la quantité voulue de cuivre électrolytique sur un petit lingot de l'élément étudié. La surface active est ensuite préparée à la meule et le culot de cuivre est tourné et fileté de manière à pouvoir se visser sur l'anticathode. On obtient ainsi un contact parfait et étendu entre le lingot et le cuivre qui n'intervient que comme support évacuant bien la chaleur.

Certains éléments ductiles (Au, Pt, Ir, Rh, Pd) peuvent se souder à l'argent sur des bouchons de cuivre. D'autres (Ni, Co, Cr...) peuvent s'y déposer électrolytiquement. Dans d'autres cas, au contraire, il faut déposer le cuivre sur l'élément (C, Si...) pour en constituer un lingot qui sera tourné et fileté. Les éléments fusibles (Ba, Ca, Sb, Sn, Zn, Ca, etc.) sont fondus dans le vide sur un bouchon. Les oxydes réfractaires étudiés comme anticathodes (terres rares, etc.) sont comprimés à la presse hydraulique dans des cavités circulaires ou des rainures pratiquées dans des bouchons de cuivre ou de fer. La préparation est ensuite desséchée à l'étuve et calcinée à haute température dans le vide. Les sels fusibles comme les verres sont enfin fondus dans le vide dans les mêmes cavités. Pour l'emploi de ces substances une source électronique linéaire est nécessaire. De plus, le tube est tourné de 180° autour du rodage V afin que la substance ne puisse tomber sur la cathode. On peut ainsi dépenser une puissance d'une vingtaine de watts sur une préparation ayant une surface utile de quelques millimètres carrés sans usure anormale.

La verrerie d'anticathode ne pourrait pas être remplacée par une électrode entièrement métallique munie d'un rodage, car l'eau bouillante évacuée fondrait la picéine. Le col de verre du bouchon est à la fois un isolateur lectrique et thermique.

La verrerie d'évacuation V, d'un diamètre de 25 mm., afin d'offrir une résistance assez faible par rapport à la vitesse de la pompe, porte une ampoule desséchante D à $P^2 O^5$ (1), une jauge à ionisation J simplement constituée par les éléments d'une triode (2). Un condenseur à neige carbonique N pour éviter l'absorption de cet élément par certaines anticathodes comme l'or, les alliages des métaux ulcalino-terreux, etc., enfin un robinet barométrique pour le contrôle de l'étanchéité. Cette verrerie relie le tube à une pompe à condensation P en quartz (3) dont le schéma est compréhen-

(1) Cette ampoule est nécessaire car un dégagement de vapeur d'eau ayant lieu dans le tube donnerait lieu à un dépôt de glace dans le réfrigérant à neige carbonique et la tension de vapeur de la glace à — 80° C. est de l'ordre de la barye, c'est-à-dire considérable par rapport au vide qu'il convient de réaliser.

(2) Cet instrument est le plus pratique pour l'estimation d'un vide de cet ordre. Les jauges de KNUDSEN et de LANGMUIR (jauge moléculaire) sont d'un emploi peu commode. BUCKLEY a récemment décrit un modèle de jauge basé sur le fait que l'ionisation positive créée par un flux de thermo-électrons varie avec la pression du gaz. Mais, dans les modèles tout d'abord construits, il n'était pas possible d'obtenir une relation linéaire entre la pression et l'intensité du courant d'ionisation produit. Pour éviter toute action de la paroi de verre, DUSHMAN et FOUND (*Phys. Rev.*, t. 17, p. 7, janvier 1921) ont utilisé un pliotron formé d'une cathode filiforme hélicoïdale en tungstène et d'une anode semblable.

Le cylindre de molybdène extérieur servait de collecteur pour les ions positifs. L'appareil était d'abord purgé de gaz par chauffage dans une étuve à 360° C et les électrodes étaient portées à l'incandescence par effet Joule et bombardement électronique. Les expériences ont été faites avec de l'argon. Ces auteurs ont trouvé que l'anode devait être portée au potentiel de + 250 V. afin d'assurer la saturation du courant électronique. Le potentiel du collecteur était de —22 V. Ils observèrent une relation linéaire entre le courant thermo-électronique et le courant ionique pour chaque valeur de la pression. Lorsque cette dernière augmente, le courant ionique croît linéairement avec elle — pour un courant électronique constant — puis de plus en plus rapidement dès que l'ionisation par chocs commence à se manifester. Une telle jauge peut se calibrer pour les pressions supérieures à 0,1 de barye par comparaison avec une jauge de MAC-LEOD en interposant un condenseur à vapeur de mercure. Pour les plus faibles pressions, on utilise les lois d'écoulement des gaz, de Knudsen.

Dans les expériences de Dushman et Found, la limite inférieure ainsi atteinte fut de 10^{-3} barye, la sensibilité n'étant limitée que par celle du galvanomètre. Le courant d'ionisation est de l'ordre du micro-ampère par barye. On peut enfin extrapoler aisément, pour les pressions inférieures à celles de l'étalonnage, la relation linéaire toujours valable qui existe entre les intensités des deux courants.

Pour une même valeur de la pression et du courant électronique, l'intensité du courant d'ions dépend de la nature du gaz. Or, celle-ci est en général inconnue. Il en résulte que cet appareil, très précieux par sa lecture directe et sa sensibilité, ne saurait donner que l'ordre de grandeur de la pression. D'après NETTLETON (*Proc. Am. Sc.*, déc. 1922), la pression correspondant au même courant d'ionisation est, pour le mercure, la moitié, pour l'hydrogène, le double, de ce qu'elle est dans l'air.

(3) Le quartz est la matière idéale pour la construction d'une pompe de ce genre. Les pompes en verre Pyrex ne sont pas en effet à l'abri d'une rupture. Les pompes en fer sont difficiles à construire étanches. Le métal est susceptible de s'oxyder et de dégager du gaz. Il ne permet pas un contrôle et un nettoyage aussi aisés.

Cette pompe nous semble supérieure à la pompe moléculaire, en ce sens que c'est un

sible de lui-même. Ce modèle que nous avons fait construire en 1918 nous a donné depuis une extrême satisfaction. Il est dimensionné pour fonctionner sous une très basse pression antagoniste afin d'offrir une très grande vitesse d'épuisement. Il est relié par des rodages à une pompe rotative à mercure de Gaëde, servant de pompe préparatrice, par l'intermédiaire d'un robinet sans résistance de Leybold pour conserver au besoin dans tout l'appareil un vide élevé.

Aucune partie de l'appareil n'étant chauffée par l'opérateur pour faciliter la libération des gaz occlus, la pression d'équilibre est un effet dynamique qui est atteint lorsque la vitesse de dégagement du gaz des parois et des électrodes égale celle d'évacuation. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire d'avoir une pompe de très grande vitesse (1).

Fonctionnement. — On peut, en partant de la pression atmosphérique, obtenir le *régime* du tube au bout d'environ un quart d'heure. Lorsque les rodages sont enduits de graisse au caoutchouc de Ramsay, on trouve qu'il est nécessaire de chauffer les filaments un peu plus qu'il ne le faut lorsqu'ils sont enduits de picéine. La pression tombe dans ce cas au millième de barye, l'appareil étant entièrement scellé et rigoureusement étanche.

Il est intéressant d'observer comment se comporte un tube de ce genre pendant son évacuation. Lorsqu'au début du fonctionnement la pression est encore de l'ordre de la barye il se produit une vive fluorescence bleue quelquefois accompagnée de *taches vertes* de l'enveloppe de quartz située dans l'hémisphère actif de l'anticathode, due à son bombardement par les rayons cathodiques diffusés au foyer. Cette fluorescence cesse ensuite

dispositif statique, beaucoup moins coûteux, ne donnant aucune vibration, ne craignant aucune corrosion par le fait de gaz chimiquement actifs et supportant sans inconvénients l'envahissement par l'eau ou par des débris de verre, accidents toujours possibles. En outre, sa vitesse d'évacuation n'est pas limitée comme l'est celle de la pompe moléculaire. La pompe Gaëde peut aussi, lorsqu'on veut rendre l'appareil transportable, être avantageusement remplacée par les pompes à huile doubles qui sont susceptibles d'abaisser la pression primaire à 0,1 barye.

La pompe Gaëde employée comme pompe préparatrice est très satisfaisante car elle fonctionne sous une pression de l'ordre de la barye pour laquelle elle possède une vitesse encore élevée. Sa pompe préparatrice à huile n'a besoin de fonctionner que quelques instants toutes les heures ou toutes les deux heures suivant la nature de l'anticathode.

Une jauge à mercure à lecture directe, comme celle de Gaëde qui indique jusqu'à 10^{-2} barye, disposée entre la pompe Gaëde et la pompe à condensation, permet un excellent contrôle du fonctionnement de l'appareil et peut dispenser de l'emploi d'une jauge à ionisation sur le tube.

La pompe Gaëde peut aussi être remplacée par un *éjecteur* à vapeur de mercure. Un groupe formé d'un tel éjecteur et d'une pompe à condensation, tous deux en quartz, a été construit par Volmer. Le vide préliminaire est entretenu de temps à autre par une simple pompe à huile. On réalise ainsi un dispositif complètement statique.

(1) On se reportera, pour tout ce qui concerne la technique du vide, à l'excellent rapport de M. DUNOYER, appartenant à cette série. On pourra également consulter les articles publiés par DUSHMAN dans la *General Electric Review* (juin-octobre 1920 et janvier-mars 1921).

brusquement pour une pression un peu plus réduite en même temps que l'intensité du courant diminue légèrement par suite de la disparition des ions positifs. Il se produit alors une légère fluorescence de la tubulure anodique dans l'hémisphère postérieur due à l'impact des rayons cathodiques dispersés repoussés par la charge spatiale. Cette luminosité finit d'ailleurs elle-même par disparaître par suite de la charge de la paroi. Les électrons diffusés sont alors tous dirigés sur la tubulure de cuivre anticathodique. Ce n'est ensuite qu'aux charges élevées que l'enveloppe de quartz fluoresce de nouveau, mais plus faiblement, dans l'hémisphère antérieur, le phénomène étant dû cette fois aux rayons X. Après un fonctionnement prolongé, toutes les parties de l'enveloppe exposées au rayonnement présentent la coloration violacée, disparaissant par thermo-luminescence d'abord *bleue*, puis *verte*, que nous expliquons [1] en admettant la présence préalable d'ions électropositifs (Si + + + + et éléments du fondant [2] Ca + +, etc.) dans le milieu. En outre, lorsque cette transformation est très accentuée, comme dans la tubulure de la fenêtre refroidie, elle s'accompagne, après arrêt du tube et observation dans l'obscurité, d'une vive *phosphorescence* bleuâtre ne disparaissant qu'après plusieurs jours et dénotant, même dans le quartz, une certaine mobilité des éléments actifs.

Il est possible, dans un tube de ce genre, d'obtenir un courant de 70 milliampères sous 10 kV. sans dépasser la « safe temperature » du filament. La suppression du condenseur à neige carbonique, de manière à introduire de la vapeur de mercure sous la pression d'une barye, n'accroît que de quelques centièmes cette intensité et n'altère en aucune manière la stabilité du régime. Ce n'est que pour des intensités de l'ordre de cent milliampères que l'arc s'amorce subitement dans la vapeur de mercure, sous cette pression d'une barye. Ce phénomène est d'une explication difficile.

Ces tubes fonctionnent normalement sous une tension *constante* voisine de 50 kV. qu'il est rarement utile de dépasser en spectrographie. Il est commode d'appliquer ce potentiel à l'une des électrodes, l'autre étant mise au sol. Lorsque l'anode est isolée, son refroidissement se fait au moyen de la pompe représentée sur la figure 10. L'enveloppe est automatiquement mise au sol par les rayons cathodiques diffusés, la tubulure de fenêtre peut alors être refroidie par une circulation d'eau non isolée et le tube monté sur un appareil métallique quelconque relié au sol. Lorsque la cathode est isolée, l'enveloppe prend le potentiel négatif de cette électrode, ce qui exige le refroidissement par air de la tubulure et l'isolement de l'appareil. L'anti-

(1) *C. R.*, t. 171, p. 627 et 717 (oct. 1920).

(2) Ces impuretés sont *nécessaires*, comme pour les phosphorescences lumineuses ou cathodique. Le quartz hyalin ne se colore pas.

cathode peut alors être refroidie par une abondante circulation d'eau froide directement empruntée à la canalisation urbaine, mais la paroi risque d'être perforée — si elle n'est pas très épaisse — dans le cas d'un brusque dégagement gazeux produisant une charge positive interne.

La puissance que l'on peut dépenser dans le tube dépend exclusivement de la conductibilité thermique de l'élément constituant l'anticathode. Avec une source punctiforme d'un millimètre carré, cette puissance est limitée à 800 watts sur le molybdène si l'on ne veut altérer la surface focale, mais sur l'or et l'argent on peut dépenser beaucoup plus et, dans un essai de ce genre, nous n'avons été limité à 1.200 watts que par la puissance d'évacuation thermique de la pompe (figure 10) l'eau bouillant violemment dans la tubulure anticathodique.

Avec des oxydes réfractaires et un foyer linéaire de l'ordre de 10 mm^2 on peut mettre en jeu un demi-hectowatt sans altérer trop rapidement la substance. Il suffit dans ce cas de refroidir l'anticathode par le même courant d'air que celui utilisé pour la fenêtre.

La puissance d'analyse de ce tube est prouvée par le fait qu'il nous a permis de découvrir dans la série L des éléments deux fois plus de lignes que ne l'avaient fait les tubes de Siegbahn. En matière d'analyse chimique, il a permis aussi de trouver des traces de substances (10^{-6}) dans des mélanges complexes. On peut, avec cet appareil, effectuer la spectrographie dans l'air de longueurs d'ondes aussi grandes que 3,5 unités Angström si l'on a soin de déplacer la plus grande partie de ce gaz, sur le trajet des rayons, par des tubes d'hydrogène obturés par des fenêtres de cellophane de 0,02 mm. d'épaisseur. Ce tube permet enfin la spectrographie par fluorescence avec un excellent rendement en disposant la substance étudiée sur un support fixé devant la fente collimatrice à l'intérieur de l'ampoule. Les électrodes sont alors légèrement excentrées, le bouchon anticathodique étant taillé de préférence à 45°.

L'auteur a également établi selon la même technique des tubes en verre Pyrex munis de fenêtres transparentes. L'un (1) possède un système d'électrodes axiales excentrées susceptibles de tourner autour d'un radiateur interchangeable disposé au centre du tube. Il est utilisé pour la production de rayons secondaires (fluorescents ou dispersés) avec un rendement élevé. Un autre est construit sur le principe de la double paroi (voy. page 99) et fonctionne sous une tension constante de 200 k V. L'anticathode peuc recevoir un épais capuchon d'argent qui ne laisse sortir le rayonnement que

(1) *C. R.*, t. 178, p. 2076 (juin 1924).

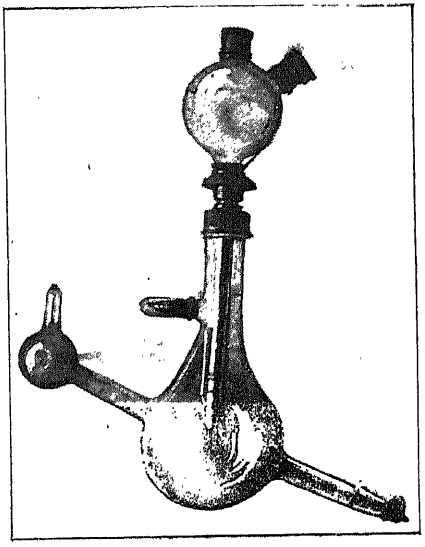


Fig. 1.

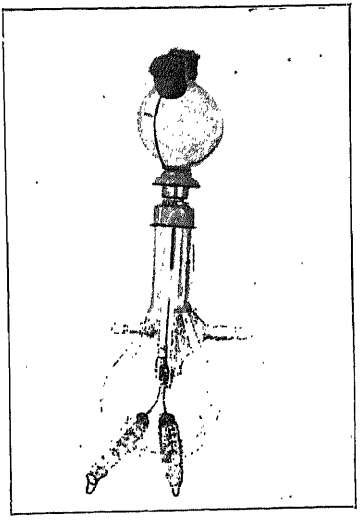


Fig. 2.

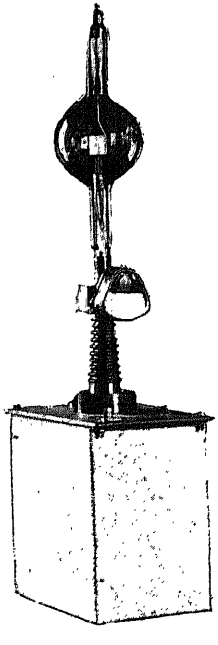


Fig. 3.

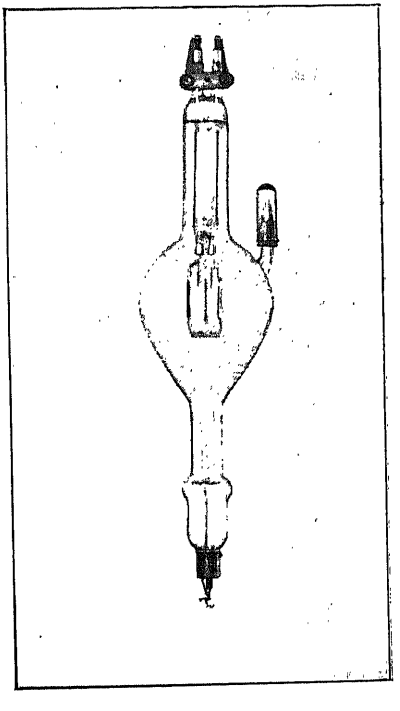


Fig. 4.

sous la forme d'un faisceau étroit évitant l'usage de tout autre dispositif de protection.

Le plus grand inconvénient des cathodes du type Coolidge en spectrographie provient du dépôt constant sur l'anticathode d'un film matériel évaporé du filament. Ce film donne des raies parfois gênantes et diminue un peu (d'un dixième) la concentration apparente de l'élément étudié. Cet inconvénient peut être prévenu en utilisant un filament d'oxydes ou de carbone ou un circuit cathodique du type Lilienfeld, tel que celui représenté sur la figure 31. On pourrait aisément construire un tube en quartz, muni d'électrodes amovibles, ne différant de celui décrit ci-dessus que par sa cathode. Les déformations possibles du filament seraient rendues sans effet par cette construction. Le foyer pourrait être plus homogène et la cathode percée pourrait être faite d'aluminium ou de graphite de telle sorte que sa pulvérisation éventuelle ne soit pas génante.

CHAPITRE III

CATHODES POINTUES

Lilienfeld (1) a appliqué à la construction d'un tube à rayons X l'émission électronique pure, dont est le siège une cathode froide dans un vide très élevé lorsque la densité électro-statique devient suffisamment grande.

Pour réaliser ces conditions, il convient d'utiliser des pointes métaliques aiguës. Le courant électronique qui prend naissance croît suivant

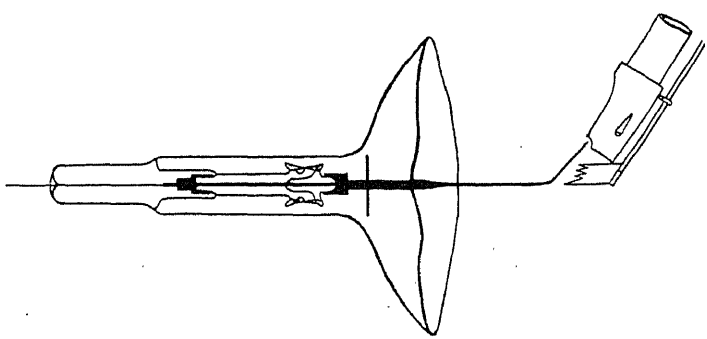


Fig. 42.

une puissance élevée de la tension appliquée, mais il est possible, si le vide est suffisamment parfait, de maintenir d'une façon pratiquement indéfinie, une décharge stable, par exemple de 5 mA moy. sous 100 k V. max. Pour maintenir ce mode de décharge, les électrodes doivent être au plus distantes d'un centimètre. La tension nécessaire pour produire un courant donné croît avec cette distance. Le vide doit être plus élevé encore que dans un tube à cathode incandescente. Une faible élévation de pression peut réduire le débit de moitié. Les électrodes doivent par conséquent être construites en métaux réfractaires, tels que le molybdène, le tantale et le tungstène, de manière à pouvoir être portées à une haute température

(1) *Ber. d. Sächs, Akad. d.Wiss*, t. 72, p. 31 (juillet 1920), *Verh. d. Deuts. Phys. Ges.* t. 2, p. 13 (1921), *Phys. Zeits*, t.23, p. 506 (1922), *Am. Journ., of Röntg.*, t. 9, p. 172 (mars 1922).

durant l'évacuation du tube. La figure 42 représente leur disposition. La cathode est une tige de 2 mm. de diamètre, terminée par une pointe effilée, coiffant l'extrémité d'une pièce de quartz solidement ancrée dans la tubulure cathodique. Elle est portée à une haute température durant l'évacuation en la soumettant au bombardement électronique issu d'une cathode pointue auxiliaire visible sous l'anticathode. Lorsque l'évacuation est terminée, cette électrode mobile est remontée et définitivement accrochée le long de l'anticathode.

Celle-ci, qui peut être refroidie d'une manière quelconque, comporte dans sa face active une cavité focale disposée en face de la pointe cathodique (d'environ 4 mm. de profondeur sur 5 mm. de diamètre). Cette disposition a pour but d'épanouir le faisceau cathodique en répartissant l'énergie en de nombreux points d'impact. En outre, la diffusion des rayons cathodiques est ainsi diminuée.

La figure 1 de la Pl. II représente le tube. On remarque l'existence d'un petit ballon auxiliaire noirci par la décharge. Ce ballon, qui comporte une cathode pointue et une anode se volatilisant facilement, sert à parfaire le vide, après le scellement. On sait, en effet, que cette opération est susceptible d'élever la pression à 4 ou 5 fois sa valeur initiale (1).

La caractéristique du tube étant déterminée par le rayon de courbure de la pointe cathodique, la même ampoule peut être munie de plusieurs cathodes différentes dirigées vers le même foyer anticathodique ou vers des foyers voisins (voir fig. 2, Pl. II). Une cathode à grand rayon servira à exciter des rayons mous car elle s'amorcera à basse tension. Une de faible rayon ne s'amorcera au contraire que pour des tensions très élevées et conviendra pour l'excitation de rayons pénétrants.

Lilienfeld (2) a cherché à mettre en évidence le *refroidissement* de la pointe qui doit, théoriquement, être la conséquence de l'*évaporation électronique* à partir de cette électrode, mais il n'a pu obtenir un résultat positif. Il a déterminé entre 500 et 3.000 volts les caractéristiques de la décharge pour les distances pointe-foyer variables (de 0,2 à 2 millimètres) et a trouvé des droites parallèles, correspondant à un potentiel critique de décharge voisin de 1.000 volts.

Lilienfeld n'a pas encore étudié les caractéristiques complètes de ces tubes. Il pense néanmoins qu'ils sont susceptibles de fonctionner à très haute tension. Un tube de ce genre fonctionnerait un peu à la manière d'un tube à gaz résistant et produirait certainement sous des tensions variables un

(1) Voir SHRADER, *Phys. Rev.*, t. 13, p. 434 (juin 1919). Pour un mode de scellement sans évolution gazeuse, voir PFUND, *Proc. Nat. Acad. Sc.*, t. 5, p. 521 (nov. 1919).
(2) *Zeits. für Phys.*, t. 15, p. 46 (mai 1923).

rayonnement plus homogène et plus pénétrant que ne le fait un tube à cathode incandescente du type Coolidge. Il n'en posséderait cependant par la souplesse, malgré les systèmes mécaniques et magnétiques du réglage de la distance pointe-anticathode proposés par Lilienfeld (1).

APPENDICE

Ayant passé en revue les différents systèmes de tubes actuels, nous pouvons essayer de dégager de cette étude quelques directives en vue de la réalisation future de tubes de grande puissance ou devant fonctionner à très haute tension. Il apparaît tout d'abord que l'avenir appartient certainement à la cathode incandescente qui permet de très gros débits sans être soumise à d'autre effet destructeur que son attraction par l'anode.

Si l'on sait construire une cathode douée d'une forte émissivité électronique, susceptible de résister à ces efforts mécaniques, la puissance du tube n'est plus limitée que par celle de son anticathode et la tension ne l'est que par les qualités isolantes de sa paroi ou, plus exactement, de ses cols ou isolateurs d'électrodes. Examinons comment ces problèmes pourraient être abordés.

1. Cathode incandescente indéformable. — Les cathodes filiformes ont l'inconvénient d'être mécaniquement fragiles, non isothermes, non équipotentielles et de n'offrir qu'une faible surface. L'auteur a proposé (2) l'emploi comme cathodes (voir fig. 43) de tubes ou de dés de tungstène, ou autre élément réfractaire, C, portés à l'incandescence par l'absorption du rayonnement thermique issu d'un filament intérieur, par conséquent protégé contre toute déformation, ou mieux, par bombardement électronique de la paroi interne à partir d'un petit filament intérieur F isolé et porté à un potentiel négatif par rapport à la surface. La température de la cathode peut être réglée, soit par celle du filament axial sous potentiel constant, soit par variation du champ à température constante.

Ce dispositif d'*étages cathodiques* exige un champ électrique polarisé de quelques centaines de volts très facile à obtenir à partir d'un transformateur T muni d'un petit kénotron K.

Cette forme constructive peut s'appliquer à toute cathode de tube électronique de grande puissance et principalement à celle du kénotron

(1) *Brevet français*, n° 525.521 (oct. 1920).
(2) *Brevet français*, n° 102.603 et add. n° 12.459 (juillet 1918 et nov. 1919).

qui, par sa nature même, doit être portée à une température élevée au voisinage immédiat d'une électrode soumise à un potentiel négatif très élevé durant les alternances que l'appareil doit arrêter. La surface C peut avantageusement être recouverte d'un film émissif convenable pour émettre un fort débit à basse température.

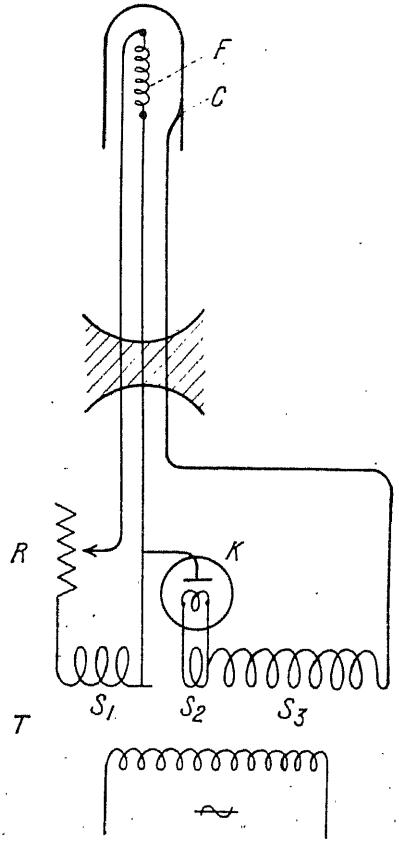


Fig. 43.

2. Enveloppes et isolateurs d'électrodes imperforables. — Nous avons vu que la presque totalité de la différence de potentiel appliquée à un tube à gaz ou à décharge électronique pure se retrouvait, dans le premier cas, sur le col cathodique, dans le second, sur le col anodique. Il en résulte la nécessité d'allonger démesurément ces cols pour pouvoir faire fonctionner ces tubes à haute tension.

Si l'appareil risque d'être soumis à une onde inverse, les deux cols doivent

avoir la même longueur et l'appareil devient, même dans l'huile, fort encombrant. C'est le cas pour un kénotron. L'auteur a proposé (1), pour rendre imperforable l'enveloppe d'un tube ou d'une soupape, l'emploi d'une double paroi, comme celle des vases Dewar, en maintenant entre les deux enveloppes une pression aussi basse que possible.

La paroi externe du tube ne pouvant être chargée par aucun bombardement ionique ou électronique, demeure électriquement neutre et l'espace vide protège contre tout effet disruptif extérieur la paroi interne. L'étincelle ne peut, avec un dispositif de ce genre, que faire le tour de l'enveloppe en jaillissant entre les deux bornes du tube. Ce mode constructif est, bien entendu, incompatible avec l'anticathode incandescente, il ne s'applique qu'aux kénotrons, tubes à gaz, tubes à anticathode refroidie et tout par-

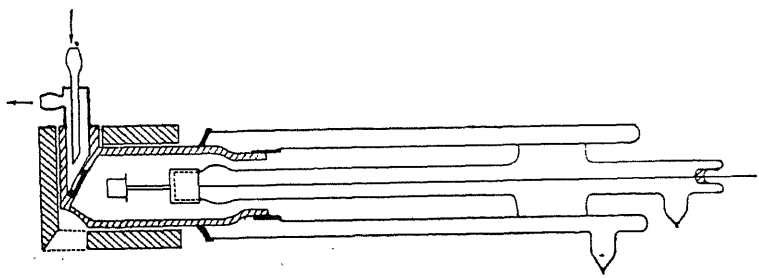


Fig. 44.

ticulièrement, sous forme d'isolateur cathodique à double paroi, au tube métallique représenté sur la figure 44 qui, sans ce perfectionnement ne saurait fonctionner sûrement. Il semble que ce dispositif doive permettre l'utilisation des plus hautes tensions.

3. Dispositifs conservateurs du vide. — Il existe de nombreux artifices permettant d'entretenir un vide élevé dans les tubes, malgré les dégagements gazeux se produisant lors de leur scellement ou d'une surcharge accidentelle. Nous avons déjà dit que les tubes Müller S. H. S. et à cathode incandescente jouissaient de cette propriété à un haut degré. Le tube Lilienfeld représenté sur la figure 1 de la Pl. II montre aussi un dispositif d'entretien du vide par décharge. La valve de Sir Oliver Lodge utilise un procédé chimique. On peut sublimer, dans un récipient latéral, un filament de tungstène, de zirconium ou de cuivre fixant mécaniquement et chimiquement les molécules du gaz sur les parois. Le four à calcium de Soddy absorbe tous les gaz chimiquement actifs. L'auteur a, en parti-

(1) *Brevet français* n° 546.763 (févr. 1922).

culier, utilisé cette propriété pour construire un tube de Braun à cathode de Wehnelt qui, quoique démontable et muni de rodages mastiqués à la picéine, est susceptible de conserver une pure atmosphère de xénon sous la pression de quelques baryes. Il est muni à cet effet d'un tube latéral en quartz contenant du calcium convenablement traité durant l'évacuation. Il suffit, après scellement, de chauffer au rouge sombre le tube à calcium pour absorber en quelques instants tous les gaz étrangers résiduels. Le magnésium et les métaux alcalins jouissent de la même propriété. Coolidge (1) les a remplacés par des éléments du groupe des terres rares, ainsi que par le zirconium ou le thorium pulvérisés chauffés *in situ*. La réaction se produit avec incandescence en fixant l'oxygène, l'azote, l'hydrogène, la vapeur d'eau, les gaz carbonés, etc. Cette fixation peut commodément s'effectuer dans un dispositif à décharge fonctionnant en même temps que la décharge électronique principale ou par chauffage par effet Joule. L'atmosphère d'argon du Tungar est purifiée de cette manière.

On sait aussi que le charbon jouit de propriétés absorbantes intenses par refroidissement. Le noir de palladium fait de même à la température ordinaire. S. Dushman (2) a montré que l'introduction de quelques milligrammes de noir de palladium *actif* dans un kénotron — simplement évacué par une pompe à huile et scellé sous une baryе — suffisait à y entretenir un vide parfait en dépit de l'évolution considérable de gaz produite par chauffage de son anode au rouge blanc. Ces procédés facilitent la conservation d'un vide très élevé dans les appareils scellés.

Certains tubes de l'avenir, qui fonctionneront sous un million de volts, ou qui mettront en jeu une puissance de centaines de kilowatts, ne pourront cependant — de par leur mode même de construction et leurs dimensions imposantes — être étuvés et scellés. Ils fonctionneront sur des pompes, comme le font les gros redresseurs métalliques à vapeur de mercure. Mais, comme ils nécessiteront déjà une véritable usine pour leur fournir cette tension ou cette puissance, la complication qui en résultera sera de bien peu d'importance.

4. Anticathodes spéciales. — Nous avons dit que la puissance d'un tube à pure émission électronique était limitée par la capacité d'évacuation thermique de son anticathode. La transformation de l'énergie cinétique des électrons du faisceau cathodique en quanta de radiation Röntgen s'effectue en effet avec un rendement excessivement faible, de l'ordre du millième. On

(1) *Patent*, n° 1.323.836 (déc. 1919).
(2 *Gen. Electric Rev.*, t. 24, p. 58 (janv. 1921).

ne peut actuellement accroître ce rendement, toutes choses restant égales d'ailleurs, qu'en élevant la tension et le nombre atomique de l'élément constituant l'anticathode, car il est proportionnel à ces deux facteurs. Le meilleur élément anticathodique serait donc théoriquement l'uranium.

Un échantillon d'uranium ductile, offert par W. D. Coolidge et que nous avons expérimenté, ne nous a cependant pas paru satisfaisant, le métal étant trop peu conducteur et aisément fusible. Il est au contraire probable que le thorium pur et ductile sera très convenable car son point de fusion doit être beaucoup plus élevé.

L'élévation de la tension constitue un moyen apparemment illimité d'accroître le rendement. Si l'on peut extrapoler la relation linéaire existant entre ces deux grandeurs on voit qu'à une tension de un million de volts correspondrait un rendement de l'ordre du centième et l'on peut envisager dès maintenant l'emploi d'une différence de potentiel de cet ordre.

Anticathodes minces. — La manière dont on utilise les rayons Röntgen issus d'une anticathode n'est pas non plus la meilleure. Kaye a montré, par l'étude du rayonnement issu de feuilles très minces d'or et d'aluminium, que les rayons étaient d'autant plus pénétrants et plus intenses qu'on les observait dans une direction plus rapprochée de celle de la propagation des rayons cathodiques. Wagner et Duane ont étudié cet effet au spectromètre et ont trouvé que, quoique la limite de haute fréquence demeurât la même, le maximum spectral se déplaçait vers les courtes longueurs d'ondes lorsqu'on se rapprochait de cette direction. Ce phénomène est important : il montre que le rendement optimum serait obtenu en utilisant le rayonnement *transmis* par une anticathode ayant la forme d'une feuille mince. Des tubes de ce genre ont effectivement été construits. Owen [1] a utilisé un tube à gaz dans lequel l'anticathode était constituée par une feuille d'argent de 0,1 mm. d'épaisseur, soudée sur un disque de cuivre raccordé à la tubulure de verre anodique par l'intermédiaire d'un dépôt de uivre électrolytique obtenu sur celle-ci en la rendant conductrice par un dépôt chimique de platine [2] : Une circulation d'eau annulaire refroidissait le disque de cuivre. Un tube du même genre dû à Coolidge est représenté sur la figure 25.

L'argent est certainement l'élément qui convient le mieux pour cet usage, car c'est le plus conducteur. L'or et les métaux lourds exercent une filtration préjudiciable sur le rayonnement transmis. Pour réaliser un tube

(1) *Proc. Roy. Soc.* t. 86, p. 426 (1912).
(2) ROEBUCK, *Phys. Rev.*, t. 28, p. 264 (1909).

puissant il conviendrait de refroidir directement l'envers de la feuille anticathodique par un courant d'eau froide, les rayons étant utilisés à travers la couche d'eau réfrigérante. Cette technique peut avoir beaucoup d'avenir si le gain obtenu par ce mode d'utilisation surpasse la perte due à l'emploi d'un élément de nombre atomique réduit. Quant à la filtration exercée par l'argent elle est excellente pour les usages thérapeutiques.

La plupart des tubes actuels possèdent, comme on le sait, une surface anticathodique inclinée à 45° sur le faisceau cathodique et la direction d'utilisation habituelle ou « rayon normal » est contenue dans le plan de symétrie de l'anticathode et est perpendiculaire à ce faisceau. L'emploi d'une surface très inclinée et d'une direction d'utilisation rasante, de manière à se rapprocher autant que possible des conditions de transmission, ne serait

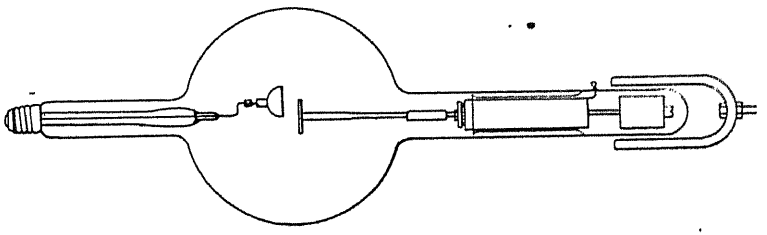


Fig. 45.

pas recommandable. La diffusion des rayons cathodiques serait augmentée et les rayons X utilisés risqueraient de subir une absorption exagérée dans l'anticathode.

Anticathodes massives. — Pour les faibles puissances, l'anticathode rayonnante de tungstène du type Coolidge Standard offre de grandes commodités. Nous avons vu qu'avec des précautions spéciales elle peut dissiper 1 kw. Coolidge (1) a cherché à en accroître la puissance par un procédé ingénieux, dû à Elihu Thomson, qui consiste à excentrer la cathode et à faire tourner l'anticathode autour de son axe au moyen d'un petit moteur à entraînement magnétique (voir fig. 45). Le point focal reste fixe dans l'espace et se déplace circulairement sur la surface anticathodique avec la vitesse angulaire imprimée par le moteur. La chaleur est répartie sur une surface beaucoup plus grande et la conductibilité thermique du métal est mieux utilisée.

Avec une anticathode tournant à 750 tours par minute et un point focal décrivant une circonférence de 2 cm. de diamètre, Coolidge a trouvé que l'anticathode pouvait dissiper deux ou trois fois plus de puissance que

(1) *Am. Journ. of Röntg.* (déc. 1915).

lorsqu'elle était immobile. Ce gain ne semble cependant pas justifier les complications inhérentes à cette technique.

Le procédé le plus efficace pour construire une anticathode de grande puissance consiste à faire cette électrode en un métal aussi conducteur que possible refroidi par une abondante circulation d'eau, et à accroître la surface focale, soit statiquement, soit par *rotation du faisceau cathodique.* Une anticathode d'argent ou d'or est plus satisfaisante, à ce point de vue, comme nous l'avons montré, qu'une de molybdène ou de tungstène, mais la première offre un mauvais rendement. Un artifice permettant de tourner cette difficulté consisterait à utiliser un filament (ou une surface cathodique incandescente) recouvert de thorium. Cet élément, qui fournit en même temps une abondante émission électronique, est assez volatil, si bien que, placé en face d'une anticathode d'argent (mince ou massive), il la recouvrirait d'un film de thorium d'une épaisseur suffisante pour arrêter complètement les rayons cathodiques et donner ainsi un excellent rendement à l'anticathode. Ce film, qui se détruirait rapidement au foyer, serait nourri et entretenu par le fonctionnement même du tube.

L'élargissement du foyer est un procédé d'accroissement de la puissance très efficace lorsque la source électronique n'est pas trop irrégulière comme cela se produit fréquemment avec les filaments. On peut d'ailleurs donner à l'anticathode la forme cylindrique du kénotron de Dushman en utilisant le rayonnement suivant l'axe. La rotation d'un faisceau cathodique *homogène* au moyen d'un champ magnétique tournant créé par un système de bobines à noyau de fer disposé autour de la cupule de concentration cathodique, semble aussi devoir être un procédé efficace. La grandeur et le déplacement du foyer sont d'importance secondaire pour les usages industriels ou thérapeutiques des rayons.

Anticathodes liquides. — La spectrographie des éléments volatils est rendue très difficile par suite de leur tension de vapeur élevée qui altère le régime du tube. On s'adresse généralement pour les étudier à leurs composés les plus stables, comme le sulfure pour le mercure, les silicates pour les métaux alcalins, les sels alcalins pour les halogènes, etc. On éprouve malgré tout de grandes difficultés, car ces composés sont réduits par les rayons cathodiques, volatilisés et dissociés par effet thermique. Müller (1) a construit un tube de laboratoire à gaz dont l'anticathode de cuivre était amalgamée et baignait dans un bain de mercure. La disposition rappelle celle de la figure 13. L'anticathode et le col anodique, où se condensait le mercure vaporisé, étaient refroidis par une circulation d'eau. La face

(1) *Phil. Mag.*, t. 42, p. 419 (1921).

active était horizontale, de même que la fente collimatrice obturée par une fenêtre transparente. Le métal évaporé au foyer y était ramené en grande partie par condensation sur les parois, retour au bain et diffusion dans le métal. Il serait sans doute possible d'utiliser une variante de ce dispositif pour étudier les métaux alcalins fondus.

Anticathodes gazeuses. — Il est à remarquer que les faisceaux cathodiques usuels sont extraordinairement raréfiés et que les surfaces anticathodiques sont extrêmement mal utilisées. Or, l'émission des rayons Röntgen se faisant par quanta apparaît comme un phénomène soumis au hasard et mesuré par la probabilité que possède l'électron incident de rencontrer dans l'atome des « régions » favorables au transfert de son énergie. Une élévation de la densité du faisceau cathodique pourrait donc augmenter le rendement.

Lilienfeld (1) a effectivement cru observer ce phénomène au moyen du tube à concentration électronique réglable dont nous avons dit quelques mots. La densité variait dans ces expériences dans la proportion de 1 à 22. Dans ces conditions, il obtenait des courbes d'absorption différentes pour la même tension de crête et le même débit, l'« Halbwertschicht » passant 8,4 à 11,7 mm. d'aluminium. Il en concluait que son tube était très supérieur au tube Coolidge et qu'il convenait de l'alimenter exclusivement par de brèves décharges donnant la plus grande densité instantanée possible, la tension constante devant être systématiquement écartée.

Wagner (2) ainsi que l'auteur (3) ont fait remarquer que le rayonnement homogène observé par Lilienfeld n'était autre que les rayons K du métal de l'anticathode. Des recherches spectrométriques effectuées avec un tube Coolidge en faisant varier la densité dans la proportion de 1 à 100 ne montrèrent pas la moindre déformation des courbes spectrales. Si un tel effet de densité existe, il ne saurait être recherché qu'en faisant varier ce facteur dans une proportion beaucoup plus grande, de 1 à 10^6 par exemple.

L'auteur a proposé (4) d'utiliser comme anticathode un courant gazeux à deux dimensions et de haute émissivité, comme un jet de vapeur de mercure, les rayons cathodiques arrivant suivant la troisième dimension.

L'appareil ressemble à une pompe à condensation, mais au lieu de laisser diffuser dans le jet les molécules que l'on veut extraire, on y envoie des électrons rapides en évitant que les ions positifs formés puissent se diriger

(1) *Forts. a. d. Geb. d. Röntg.*, t. 25, p. 77 (nov. 1917).
(2) *Jahrbuch, d. Rad. u. Elektr.*, t. 16, p. 190 (déc. 1919).
(3) *Ann. de Phys.*, t 13, p. 49 (mars 1920).
(4) *Brevet français*, n° 102.603 (nov. 1919).

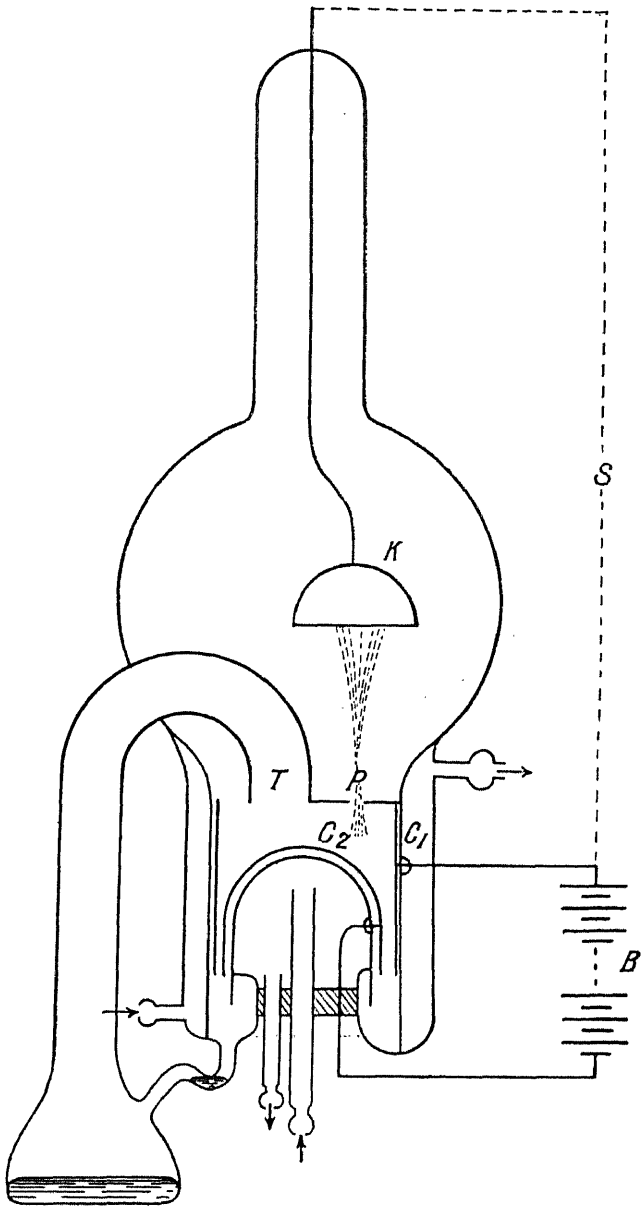


Fig. 46.

vers la cathode. La figure 46 représente le schéma de cet appareil qui serait avantageusement construit en quartz. La vapeur de mercure débouche latéralement de la tubulure T sous une pression de l'ordre de 10^{3} baryes et se condense sur les parois C_1 et C_2 refroidies à une température suffisamment basse (à —33° C par exemple, au moyen d'une machine à ammoniac) pour que la tension de vapeur du mercure dans le compartiment cathodique soit négligeable (10^{-3} barye à —33° C). Une très basse pression est d'ailleurs entretenue dans cette partie de l'appareil par son fonctionnement comme pompe à condensation.

Le faisceau cathodique très concentré (au besoin par des électrodes auxiliaires annulaires portées à des potentiels négatifs, car la charge de l'espace peut être réglée par la température du réfrigérant) est accéléré dans le champ principal produit entre la cathode K et une plaque P. Celle-ci est disposée un peu au-dessus du jet de vapeur et elle est percée d'un trou laissant passer le faisceau. L'anticathode occupe un volume gazeux diffus de l'ordre du centimètre cube situé au-dessous de l'orifice. Les ions prenant naissance dans ce volume sont drainés et fixés par un champ électrique dans la chambre de condensation, qui est en même temps une chambre d'ionisation. A cet effet les parois C_1 et C_2 sont conductrices et reliées aux pôles d'une batterie B.

La puissance que l'on pourrait dépenser dans cet appareil ne semble pas limitée comme elle l'est sur une surface solide et l'on peut espérer pouvoir réaliser ainsi un générateur quasi-industriel.

Cette disposition pourrait aussi être utilisée pour la spectrographie des éléments volatils comme les métaux alcalins. Le réfrigérant devrait alors être porté à la température de l'eau bouillante.

CHAPITRE IV

SOUPAPES CATHODIQUES

Ces appareils sont des dispositifs statiques fort utilisés dans la technique et dont le rôle est de s'opposer au passage du courant inverse dans un tube à rayons X lorsque celui-ci est directement alimenté par un générateur donnant une force électromotrice induite alternative.

Max Kohl (1) a proposé pour cet usage l'emploi de batteries de soupapes électrolytiques à anode d'aluminium dont chaque élément peut résister, comme on le sait, à une tension inverse atteignant 500 volts. La capacité formidable de ces cellules et les fuites importantes qu'elles présentent ne leur permettent cependant pas de rivaliser avec les soupapes à gaz raréfiés ou non.

La plus simple de ces dernières consiste en un éclateur dissymétrique pointe-plaque dans l'air ou, mieux, dans un gaz inerte comme l'azote, à la pression atmosphérique ou à une pression un peu inférieure. On sait que le potentiel disruptif est moindre lorsque la pointe est positive que lorsqu'elle est négative. Un perfectionnement a été apporté à ce système par Duddell (2) qui introduit la pointe (supportée par un isolateur) au centre d'une sphère creuse conductrice remplaçant la plaque. On peut utiliser un chapelet de ces soupapes disposées en série. Elles ne sont efficaces que pour de faibles débits et consomment beaucoup de puissance, le tiers par exemple de celle dépensée dans l'ampoule.

Au lieu d'utiliser la décharge disruptive, il est préférable de s'adresser à un phénomène parfaitement régulier comme l'apparition des couronnes (*corona effect*) sur un conducteur cylindrique. La soupape est alors formée d'un fil conducteur tendu suivant l'axe d'un cylindre métallique. On peut rectifier ainsi un courant atteignant 30 m A. moy. et la tension est presque illimitée. Le rendement laisse cependant encore à désirer.

Les soupapes cathodiques proprement dites peuvent, comme les tubes à

(1) *Zeits. für Elektr.* (août 1909).
(2) *Journ. Röntg. Soc.* (1909).

ayons X, être caractérisées par leur cathode et tout ce que nous avons dit
e cette électrode peut encore s'appliquer dans ce cas. Aussi serons-nous
rès bref sur ce sujet.

L'arc dans la vapeur de mercure n'est pas utilisable comme soupape
u-dessus de 10 k V. La cathode de Wehnelt est également peu utilisable
our les tensions qui nous occupent. Hittorf et Villard ont construit des
oupapes cathodiques à gaz. Celle de Villard (1) (voir fig. 47) comporte

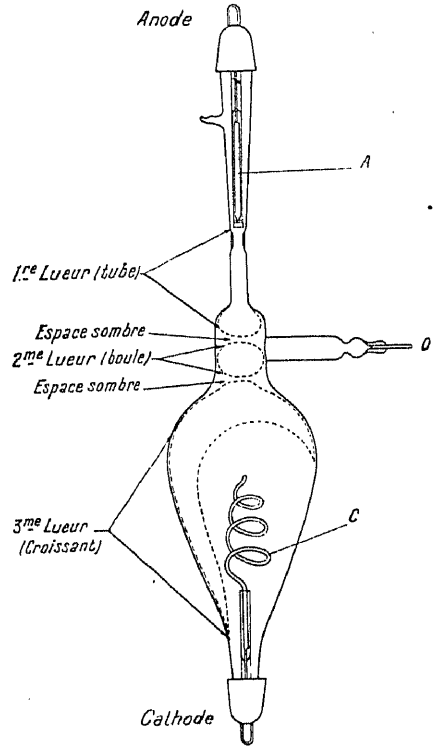


Fig 47.

leux électrodes d'aluminium très dissymétriques A et C. Le gaz résiduel
st de l'hydrogène sous une pression de quelques dizaines de baryes entre-
enue par un osmo-régulateur O. L'alimentation par l'afflux se fait aisé-
ient pour l'électrode de grande surface, mais très difficilement pour l'anode
logée au fond d'un tube étroit. La chute de potentiel dans le sens le plus
avorable est néanmoins de l'ordre du kilovolt et le débit ne saurait
épasser 20 ou 30 m. A moy. sans que la cathode C ne risque de fondre.

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 181 (1899).

Cette soupape résiste difficilement à des tensions inverses, surtout constantes, excédant 50 k V. Le verre de la tubulure anodique, bombardé par l'afflux, chauffe alors dangereusement. La pression la plus favorable se règle d'après l'aspect du tube : elle correspond à l'apparition d'une lumière négative rose en forme de croissant entourant la cathode à quelque distance. Une boule lumineuse, correspondant à la première strate de la lumière positive, doit se détacher au niveau du régulateur.

La soupape cathodique de Koch est construite d'une manière analogue à celle des tubes à rayons X. L'électrode faisant office de cathode dans ces derniers devient alors l'anode et l'anticathode est remplacée par un volu-

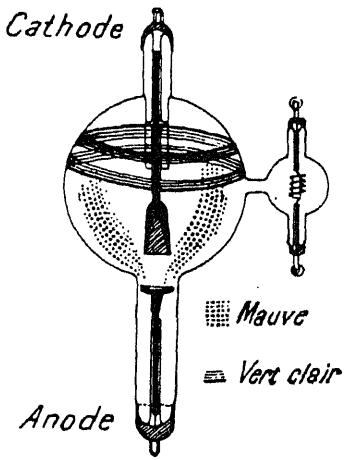


Fig. 48.

mineux entonnoir d'aluminium dont l'ouverture s'approche très près de l'anode, afin de prévenir sur celle-ci l'impact de l'afflux. La figure 48 représente le modèle construit par les Établissements Gaiffe-Gallot et Pilon. Sir Oliver Lodge a imaginé un perfectionnement de ces appareils. Sa soupape ressemble beaucoup à celle de Villard, mais l'anode, qui est en fer, y est entourée par un tube de cuivre isolé remplissant la tubulure anodique. Ce dispositif accroît la résistance dans le sens inverse. La pression y est très basse et ne se modifie pas par l'usage. Elle est entretenue par la décharge elle-même : un film de phosphore blanc ayant été distillé sur la paroi interne de l'ampoule. Sous l'influence du bombardement cathodique, ce phosphore se transforme en sa variété allotropique rouge en fixant l'oxygène, l'hydrogène et l'azote.

Les meilleures soupapes cathodiques sont incontestablement celles à cathode incandescente. Des valves de ce type ont été décrites autrefois par

Fleming [1], mais leur vide insuffisant ne les rendaient pas utilisables pour les hautes tensions. A la suite des travaux de Langmuir, Dushman [2] a construit une valve susceptible de résister d'une manière parfaite à des tensions inverses de l'ordre de 100 kV. Cet appareil a été désigné sous le nom de kénotron. Nous ne décrirons pas ici les modèles de grande puissance (pouvant rectifier 40 kw. sous 15 kV.) qui ont été construits suivant le principe du tube métallique de la figure 25. Nous ne considérerons que les types adaptés aux très hautes tensions.

Cet appareil rappelle par sa construction le tube Coolidge et est évacué avec un soin égal suivant une technique analogue. La cathode incandescente est un boudin de gros fil de tungstène (de 0,3 à 0,4 mm. de diamètre) solidement ancré par des supports rigides dans l'axe d'une anode cylindrique de molybdène. Le filament est chauffé à la plus basse température possible compatible avec une faible dépense de puissance dans l'anode (celle-ci ne doit pas dépasser le rouge sombre). L'intensité du courant direct est limitée par la surface et la température du filament (voir fig. 28), et surtout par le refroidissement de l'anode qui s'effectue dans ce cas par rayonnement thermique.

La caractéristique de ce type de décharge est une loi de la forme :

$$i = K\, V^{3/2},$$

car les parois ne peuvent ici jouer aucun rôle. Si l'on désigne par i_0 l'émission électronique, exprimée en milliampères par centimètre de longueur du filament, et par r le rayon de l'anode, la chute de tension V est donnée par l'équation de Langmuir :

$$V^{3/2} = \frac{i_0\, r}{14{,}6} \qquad \text{kV.}$$

Les plus grandes difficultés que l'on rencontre pour établir des kénotrons susceptibles de résister à de hautes tensions viennent du fait que le filament, ramolli par une température très élevée, est soumis, durant l'alternance inverse, à une attraction intense de la part de l'anode. Le calcul montre que, s'il est utilisé pour charger un condensateur au potentiel de crête V_{max} d'une onde de tension sinusoïdale alternative, il est soumis à une tension efficace égale à $V_{max}\,\frac{\sqrt{3}}{2}$, soit 1,22 V_{max}. C'est pour cette raison qu'on

(1) *Proc. Roy. Soc. London*, t. 74, p. 476 (1905).
(2) *Gen. Electr. Rev.*, t. 18, p. 156 (mars 1915).

lui donne un gros diamètre et qu'on le centre dans l'axe d'une anode cylindrique de manière à équilibrer les forces attractives. Tous les procédés qui consistent à le protéger par des grilles ou des anneaux au potentiel de la cathode, augmentent la chute de potentiel interne en accroissant l'effet de la charge spatiale. Ils ne sont acceptables que pour les valves destinées aux faibles débits. Le système cathodique décrit page 95 sera indispensable pour réaliser les kénotrons de grande puissance qui seront exigés pour le transport futur de l'énergie à grande distance sous tension constante. La figure 3 de la Pl. II représente le kénotron du type américain construit par les Établissements Gaiffe-Gallot et Pilon. Le filament axial est entouré dans sa partie médiane par un petit anneau métallique qui s'est révélé être extrêmement efficace au point de vue de la protection du filament. Ce modèle résiste à une tension inverse atteignant 170 k V. max. Il est représenté monté sur son transformateur d'allumage. Pour les très hautes tensions les cathodes sont plus commodément chauffées au moyen de petites dynamos bien isolées entraînées par des moteurs au moyen de longs arbres isolants.

Il est à remarquer que, contrairement au tube Coolidge, c'est la tubulure cathodique du kénotron qui doit être allongée et particulièrement isolée. L'immersion dans l'huile ou le mode constructif décrit page 96 conviennent pour assurer cette protection.

La cathode d'un kénotron doit aussi être constamment portée à la température qui assure le passage du *maximum d'amplitude* de l'onde d'intensité utilisée *sans que le courant de saturation ne soit atteint* à aucun moment. Cette recommandation est surtout importante lorsque le kénotron est inséré dans le secondaire d'une bobine d'induction qui donne de rares décharges d'une grande intensité momentanée. Il faut aussi se garder de laisser un kénotron en circuit sans que la puissance du générateur ne soit absorbée dans un récepteur, auquel cas, la saturation se produisant aussitôt, la tension se reporterait sur le kénotron dont l'anode serait instantanément détruite.

On peut naturellement construire des soupapes à une seule cathode ayant plusieurs anodes isolées, de manière à remplacer par un seul appareil deux ou plusieurs kénotrons. Le montage de la figure 84 (A et B inversés) s'exécute ainsi commodément au moyen d'une soupape bianodique. Le redressement d'une tension triphasée peut aussi se faire avec un kénotron à trois anodes et un filament commun placé au point neutre. La meilleure disposition anodique consiste à utiliser des électrodes cylindriques coaxiales.

On a aussi construit des soupapes à cathode incandescente en utilisant un circuit de décharge du type Lilienfeld (voir fig. 4, Pl. II). Ce dispositif a l'avantage de réduire beaucoup l'attraction exercée sur le filament puisqu'il

existe une chute de potentiel importante le long de la tubulure anodique. L'anode est un petit disque métallique non refroidi artificiellement, sa température étant indépendante de l'intensité du courant. C'est la tubulure anodique de verre qui s'échauffe durant le passage de la décharge. Ces soupapes peuvent débiter plusieurs centaines de milliampères mais elles résistent mal aux tensions inverses excédant 80 kV.

CHAPITRE V

DISPOSITIFS DE PROTECTION

Il devient chaque jour plus important, avec les sources toujours plus puissantes de rayons Röntgen que la technique met à notre disposition, de se protéger efficacement contre le rayonnement inutilisé, et l'exemple douloureux des martyres endurés par de trop nombreux pionniers de la radiologie doit inciter à la prudence. Les rayons sont d'autant plus nocifs qu'ils sont plus absorbables par les tissus et partant de plus grande longueur d'onde. Avec un tube tel que celui de la figure 39 fonctionnant, par exemple, avec 20 milliampères sous 50 k V., l'effet Villard est presque instantanément obtenu devant la fenêtre transparente. C'est dire que quelques secondes d'inattention peuvent provoquer le plus dangereux érythème. Les tubes métalliques sont presque toujours inoffensifs à ce point de vue. Ceux construits en verre ou en quartz sont généralement utilisés dans de vastes boîtes de plomb munies de portes latérales roulantes. L'auteur a fait construire, pour de telles boîtes, d'épais manchons isolants en verre au plomb (1) qui, tout en assurant un parfait isolement jusqu'à 150 k V. des conducteurs d'amenée et des canalisations d'eau réfrigérantes, évitent toute fuite de rayonnement. De simples manchons en verre au plomb, ajustés sur les tubes dont la tension n'excède pas 80 k. V, suffisent, en général, à assurer une protection suffisante. Pour les tubes utilisés en radiodiagnostic la cupule de Coolidge décrite page 60 constitue une protection parfaite.

Celle-ci est beaucoup plus difficile à réaliser lorsqu'on fait fonctionner les tubes sous des tensions de l'ordre de 200 k V. comme cela s'effectue couramment en thérapeutique. L'expérience montre alors qu'un écran fluorescent s'illumine encore nettement lorsque les rayons ont traversé un écran de plomb de 3 mm. d'épaisseur. Il faut 5 mm. de plomb, avec quelques hectowatts dans l'ampoule, pour supprimer toute luminosité. Mais l'œil accommodé est un détecteur d'une sensibilité prodigieuse et la plaque

(1) Verrerie Appert, à Clichy.

photographique, qui intègre les impressions, décèle le rayonnement à travers des épaisseurs encore plus grandes. Il serait puéril de prétendre que l'expérimentateur est en danger tant que la plaque est impressionnée. La question de la dose absorbée pendant l'unité de temps joue, au point de vue biologique, un rôle essentiel. Il ne vient par exemple à l'esprit de personne de se soustraire à la lumière solaire diffuse sous le prétexte que la radiation directe peut causer un érythème cutané. Il en est de même pour les rayons Röntgen.

Il est absolument nécessaire, lorsque la tension d'alimentation atteint

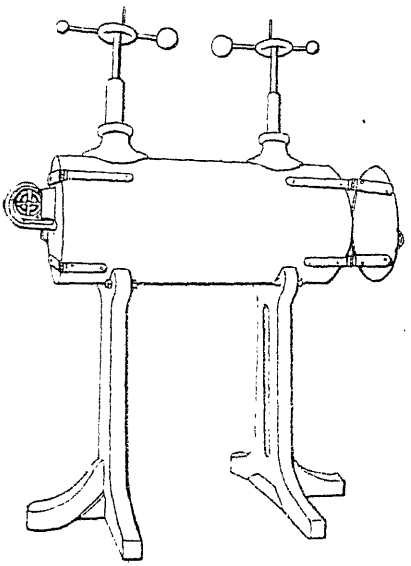


Fig. 49.

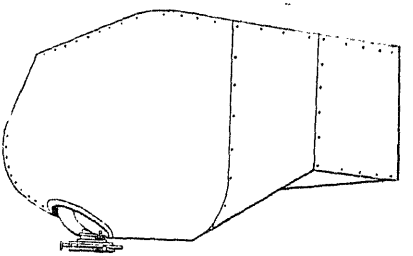


Fig. 50.

200 kV., d'enfermer *complètement* l'ampoule dans une enceinte opaque. Les tubes à gaz, qui ne se prêtent pas facilement à ce montage, offrent de réels dangers, car les cupules cylindriques ou hémisphériques en verre au plomb dans lesquelles on les dispose habituellement n'assurent qu'une protection insuffisante. Les rayons de courte longueur d'onde se diffusent beaucoup plus qu'ils ne sont absorbés et semblent, par cet effet, se répandre dans l'espace à la manière d'un gaz. On a construit à l'étranger de vastes boîtes de plomb, soit cylindriques et en forme d'étuve, supportées par de hautes consoles, comme le modèle américain « International » (voir fig. 49), soit sous celle de hottes suspendues latéralement aux murs, comme le dispositif de Siemens et Halske (voir fig. 50). Ces appareillages coûteux et encombrants

exigent en outre une circulation d'air pour refroidir le verre des ampoules qui sont le plus souvent des tubes Coolidge de grande longueur. L'auteur a proposé (1) de noyer complètement le tube dans un bain d'huile contenu dans une cupule de plomb entièrement close. Ce dispositif a l'avantage de permettre, par suite de la rigidité diélectrique élevée de l'huile, une double réduction de la longueur du tube et des dimensions de la cupule. La paroi de verre est en outre automatiquement refroidie par le brassage

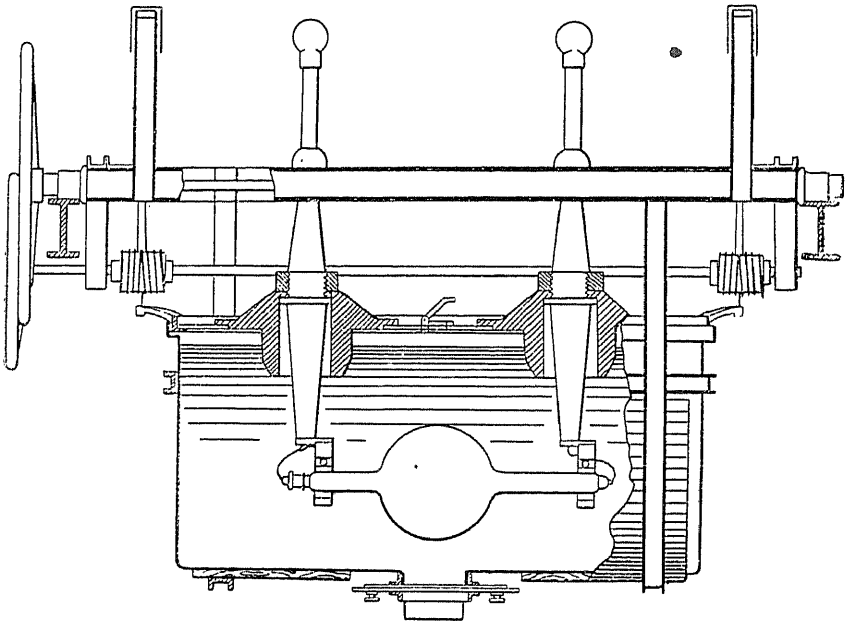


Fig. 51.

électrostatique du diélectrique et les tubes à anticathode incandescente voient leur puissance augmentée. L'absorption des rayons par l'huile est prévenue en déplaçant ce liquide — entre la paroi du tube et la fenêtre transparente de la cupule — par exemple, au moyen d'une ampoule de verre évacuée d'air et scellée. Ce montage offre même un accroissement du rendement (2) en rayons de courtes longueurs d'ondes par l'effet dispersif, vers l'orifice d'utilisation, des couches d'huile avoisinant l'ampoule. La figure 51 montre une forme de réalisation de ce procédé. (Établissements Gaiffe-Gallot et Pilon.)

C'est, bien entendu, le plomb qui est le seul élément pratiquement uti-

(1) *Brevet français*, n° 92.790 (juillet 1917).
(2) R. LEDOUX-LEBARD ET A. DAUVILLIER, *Journ. de Rad.* (août 1923).

lisable pour assurer une protection efficace. C'est le moins volumine le plus maniable et le moins coûteux des absorbants. La discontin d'absorption K de cet élément ($\lambda = 0{,}145$ Å) limite cependant un dom

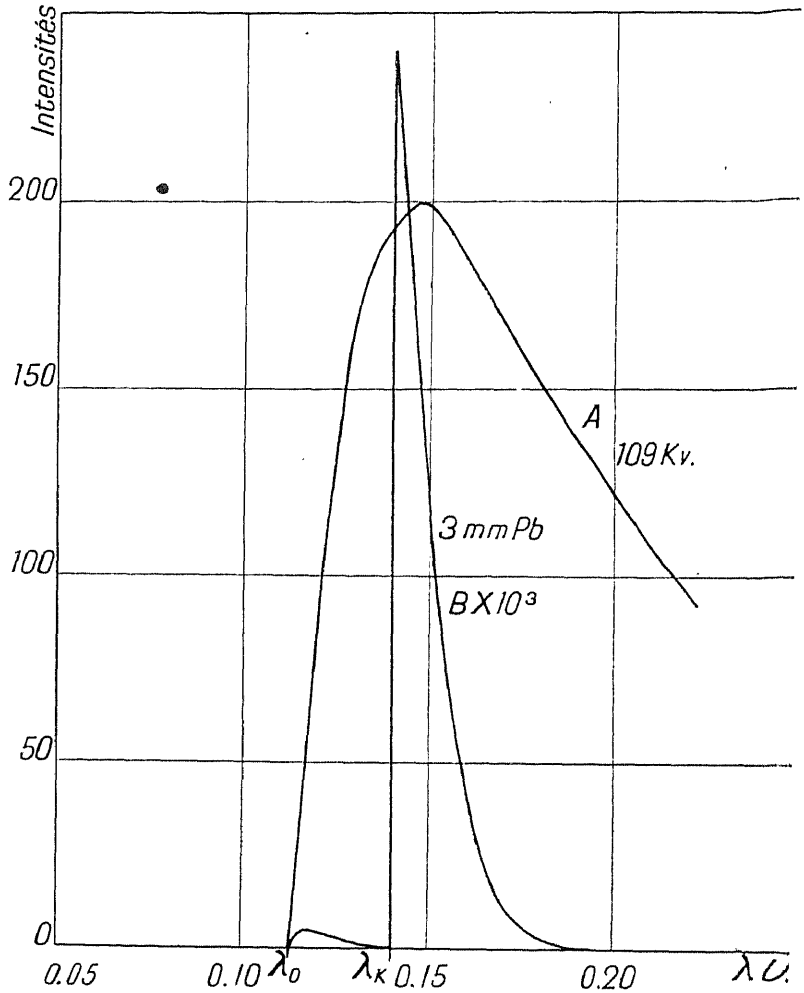


Fig. 52.

spectral de haute fréquence (bande d'absorption L) où, à égalité de ma il absorbe moins que l'argent. A son maximum de transparence, un é de plomb de 6 mm. d'épaisseur laisse filtrer 36.10^{-6} de l'intensité incid et il est tout à fait opaque (10^{-10}) pour les rayons K du tungstène

Nous avons par exemple représenté sur la figure 52 le spectre con

d'un rayonnement excité sous une tension constante de 110 k V. (courbe A) et celui qui résulte de sa filtration par 3 mm. de plomb (courbe B), les ordonnées du second étant multipliées par 10^3. On voit que le rayonnement transmis est quasi monochromatique (0,14 Å $< \lambda <$ 0,16 Å). Son intensité globale ne dépasse pas 5.10^{-5} de l'intensité du rayonnement issu de la paroi de verre de l'ampoule. La bande de « transparence » du plomb n'est donc pratiquement pas gênante, mais le coefficient d'absorption prend dans la bande K des valeurs bien plus faibles pour des longueurs d'ondes couramment excitées avec les appareillages modernes. Ainsi pour $\lambda = 0{,}07$ Å l'écran de 3 mm. de plomb transmet une intensité déjà dix fois plus grande que dans l'exemple précédent, mais une épaisseur de 1 cm. est pratiquement opaque (10^{-6}).

DEUXIÈME PARTIE

CHAPITRE VI

FORME DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE DANS LES TUBES

Nous n'avons jusqu'ici fait aucune hypothèse sur la manière dont était produit le champ électrique appliqué entre les électrodes et dans lequel les électrons émis par la cathode acquerrent leur énergie cinétique avant de rencontrer l'anticathode. Ce champ peut avoir une loi de variation périodique en fonction du temps absolument quelconque, à condition qu'il soit toujours de même sens. La décharge électrique dans le tube, c'est-à-dire la loi de variation de l'intensité du courant en fonction du temps, dépendra à la fois de la « forme » de la différence de potentiel appliquée et de la nature du dispositif cathodique. Les faisceaux cathodiques produits pourront différer considérablement suivant les générateurs et les tubes, et, comme le spectre des rayons X émis reflète étroitement les caractères de celui du faisceau cathodique (le spectre magnétique par exemple), la qualité et l'intensité de la radiation Röntgen pourront présenter des différences considérables. Nous allons donc énumérer tout d'abord les différentes formes de forces électromotrices que l'on rencontre dans la pratique et les caractères de la décharge, pour chacune d'elles et chacun des types de cathodes considérés. Les qualités respectives des différents générateurs alimentant les divers tubes ressortiront immédiatement de cette étude comparée.

Trois formes essentielles de forces électromotrices sont utilisées dans la technique. Ce sont :

1° L'onde pulsatoire à front raide et à chute d'allure exponentielle

dont la durée est très variable suivant la puissance fournie. Elle est donnée par les bobines ou inducteurs à interrupteur.

2° L'onde sinusoïdale d'équation classique :

$$V = V_{max} \sin \frac{2\pi}{T} t$$

dans laquelle T représente la durée du cycle complet ou période, suite de deux alternances. Cette onde de tension est fournie par les distributions de courant alternatif et n'est pas altérée d'une façon notable par les transformateurs.

Il suffit, pour la polariser, soit d'arrêter l'une des alternances, soit de la redresser, par commutation mécanique synchrone ou par l'emploi de soupapes cathodiques.

3° La tension constante en amplitude et dans le temps, qui est fournie, par une batterie d'accumulateurs ou de dynamos à haute tension, une machine électrostatique ou un condensateur dont la charge est entretenue par un mécanisme approprié.

Nous avons par ailleurs à notre disposition trois types essentiels de tubes (à afflux, à cathode Coolidge, à cathode Lilienfeld). Avec ces trois catégories de générateurs, nous pouvons donc réaliser neuf combinaisons possibles. Il s'agit de savoir quel est le générateur qui, pour chaque sorte de tube, lui donne le meilleur rendement et la plus grande stabilité. Ce problème ne peut être résolu que par l'étude oscillographique des deux facteurs électriques de la puissance en fonction du temps. Nous sommes donc amenés à étudier la forme de la décharge dans les tubes.

La loi de variation du courant en fonction du temps, dépendant plus de la nature de la cathode que de la forme de la tension, nous l'étudierons en reprenant l'ordre que nous avons déjà suivi à propos des tubes.

1. Méthodes d'analyse. — Lorsque la forme de la différence de potentiel est connue *a priori*, comme c'est le cas pour une tension constante ou sinusoïdale, de fréquence donnée, il suffit d'étudier les variations instantanées du courant dans le tube pour connaître les caractères de la décharge. Cette étude peut s'effectuer simplement en examinant au miroir tournant un tube de Gehrcke à lumière négative (1) ou « ondoscope » disposé en série avec l'ampoule, ou en le faisant tourner autour de l'un de ses pôles en synchronisme avec la source périodique. Cette méthode a été utilisée en particulier

(1) Ces appareils sont simplement constitués par un tube cylindrique de verre, d'environ 20 cm. de longueur et de 4 cm. de diamètre, muni de deux électrodes symétriques, axiales et filiformes d'aluminium. La pression y est assez grande pour que la lumière négative recouvre la cathode et la longueur de cette luminosité est sensiblement proportionnelle à tout instant à l'intensité du courant, comme Hehl (*Diss. Erlangen*, 1901) l'a montré.

par Voltz (1) pour étudier la forme de la décharge dans le tube S. H. S. que nous avons décrit plus haut. Wertheimer a montré, en comparant les indications fournies par un tube de Gehrcke, un de Braun et un oscillographe bifilaire, que celles du premier ne coïncidaient pas exactement avec celles des deux autres. La longueur de la lumière négative ne varie pas de la même manière en fonction de l'intensité du courant suivant le diamètre la nature du fil et l'état de sa surface, si bien que cette méthode ne paraît pouvoir fournir que des résultats qualitatifs. Par contre, il est aisé d'obtenir la représentation exacte du courant au moyen d'un tube de Braun ou d'un oscillographe du type de celui de Duddell ou de Blondel.

Mais une étude oscillographique de la forme du courant n'a en général de

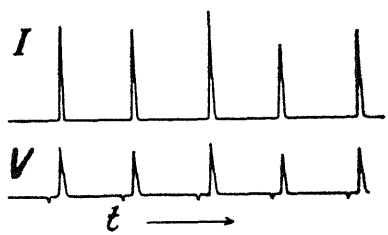


Fig. 53.

Forme de la décharge dans un tube à gaz résistant, fonctionnant sur inducteur avec soupape de Duddell en série. Tension : $V_{max} = 39$ kV. Intensité : $I_{max} = 25$ m. A, $I_{eff} = 5{,}4$ m. A, $I_m = 1{,}0$ m. A. Fréquence : N = 75 p. : sec.

valeur que si elle est accompagnée de la représentation simultanée de la tension. La connaissance de celle-ci est indispensable dans le cas d'un inducteur et, même dans celui d'une tension sinusoïdale, elle est très précieuse, car des différences de phase peuvent se produire entre le courant et la tension et elle permet la représentation de la caractéristique dynamique au sens que lui a donné Simon.

Duddell (2) a ainsi enregistré photographiquement, avec son oscillographe bifilaire double, la tension et l'intensité dans un tube à gaz alimenté par une bobine. Il trouva (voir fig. 53) que les deux ondes avaient la même forme, soit sensiblement celle d'un triangle rectangle, le front d'onde et la durée étant représentés par les deux côtés de l'angle droit. Ces décharges, très aiguës, avaient une durée variant de $1{,}2.10^{-3}$ sec. à $0{,}87.10^{-3}$ sec. lorsque la pression du gaz passait d'une valeur élevée à une très basse. La forme de la décharge n'était pas modifiée lorsqu'on remplaçait le tube par une résistance aqueuse de 4.10^6 ohms.

Cette méthode a malheureusement un grave défaut : les deux équipages

(1) *Arch. für Elektrotechnik*, t. 9, p. 247 (1920).
(2) *Journal Röntg. Soc.*, t. 4, p. 100 (juillet 1908).

bifilaires, celui des milliampères et celui des kilovolts, ont nécessairement la même sensibilité si bien que le second, disposé en dérivation sur le tube avec une résistance série (tube d'eau) de 3.10^6 ohms, double la charge et modifie le régime d'une manière inconnue.

La principale difficulté de ces mesures réside donc dans le relevé oscil-

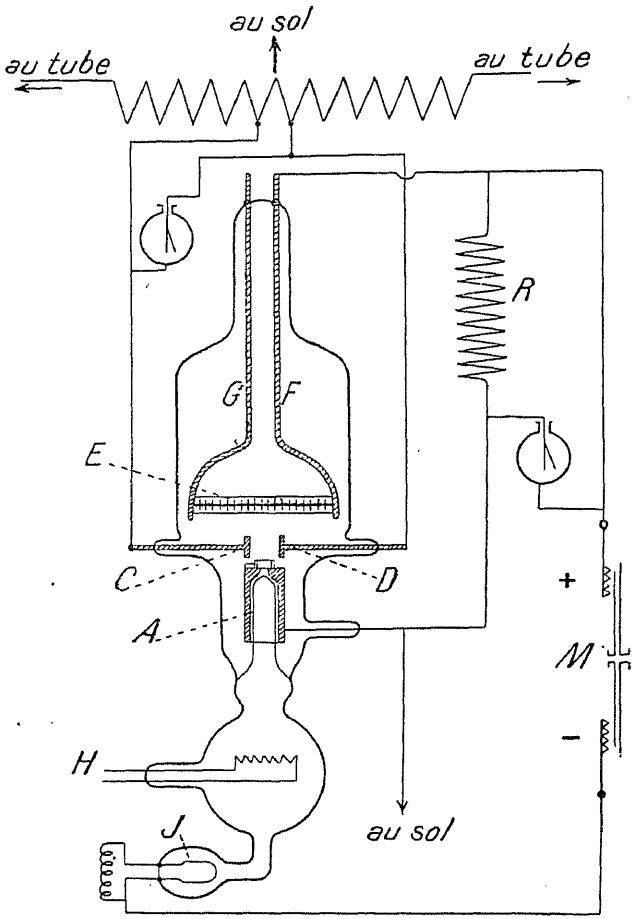


Fig. 54.

lographique de la tension aux bornes du tube, relevé qui devrait s'effectuer en circuit ouvert. Le tube de Braun (1) à cathode d'aluminium ou cathode de Wehnelt ne convient pas pour les tensions supérieures à quelques kilovolts. Muni d'une cathode incandescente, il devient un excellent appareil

(1) De nombreux perfectionnements ont été apportés à cet appareil par DUFOUR (*C. R.*, t. 158, p. 1339 (1914) ; *Bull. Dir. Rech. et Inv.*, p. 54 (sept. 1922).

de mesure susceptible de supporter une tension élevée et de tracer directement la caractéristique du tube. Mais il est difficile d'employer une cathode du type Coolidge dont la lumière serait gênante. On peut cependant utiliser un filament recouvert de thorium, ou d'un élément alcalino-terreux (1), qui fonctionne au rouge, ou employer une cathode de Lilienfeld recourbée du type de celle représentée sur la figure 31. Lilienfeld (2) a décrit un tube oscillographique de ce genre que nous reproduisons sur la figure 54 car son mode constructif est susceptible d'être utilisé pour des montages de laboratoire. La cathode percée A, qui est au sol, est munie d'un petit canal supplémentaire protégeant le faisceau cathodique jusqu'au point où il pénètre dans le champ à étudier appliqué entre les plateaux C et D (8 × 10 mm. ; 17 mm. de distance). Ce faisceau est produit à partir de la cathode incandescente J au moyen d'un champ électrique constant entretenu par la machine électrostatique M dont le pôle positif est relié à l'écran fluorescent conducteur E.

On reconnaît en R la grande résistance du dispositif potentiométrique de Lilienfeld. L'écran E est formé d'un léger dépôt de substance fluorescente (WO^1 Ca?) sur une feuille mince de platine iridié inclinée à 45° et découpée de manière à constituer une résistance qui peut être portée à l'incandescence par effet Joule au moyen des conducteurs G et F, afin de la purger de ses gaz. La cathode auxiliaire H est utilisée pendant l'évacuation dans le même but.

Le champ électrique appliqué entre les plateaux C et D n'excédait pas 3.000 volts dans les mesures que fit Lilienfeld avec cet appareil, mais il semble, que, si la pression est suffisamment basse, il soit possible d'appliquer des tensions bien plus élevées. Nous reviendrons sur les résultats de Lilienfeld en parlant de la forme de la décharge dans son tube.

La méthode de Joubert a été utilisée par Wertheimer (3) pour étudier la caractéristique dans un grand domaine de pressions (depuis 45.10^{-3} jusqu'à 1 barye) d'un tube bicathodique à gaz soumis à une tension alternative sinusoïdale qui atteignit jusqu'à 18 k V. Ce beau travail, effectué avec beaucoup de soin, montra que la caractéristique dynamique était une ellipse déformée, parcourue dans le sens des aiguilles d'une montre lorsque la pression était supérieure à 500 baryes et dans le sens inverse pour les plus faibles pressions. Comme on le sait, la caractéristique d'une grande résistance est

(1) Le remarquable oscillographe cathodique de la « Western Electric Cº » possède une cathode de Wehnelt. J. B. Johnson, *Electr. Com.*, t. 1, p. 57 (nov. 1922) et *Rev. Gén. de l'Electr.*, t. 14, p. 323 (sept. 1923).

(2) *Ber. der Math. Phys. Kl. der Sächs, Akad. Wiss. Leipzig*, t. 71, p. 113 (février 1919).

(3) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 7, p. 120 (oct. 1911); t. 8, p. 21 (janvier 1912) et p. 49 (avr. 1912).

une droite légèrement inclinée sur l'axe des différences de potentiel V. Celle d'une capacité est une ellipse symétrique centrée sur l'origine et parcourue dans le sens inverse de celui des aiguilles d'une montre. Une résistance shuntée par un condensateur aura donc pour caractéristique une ellipse inclinée sur l'axe des V. Or, nous avons vu qu'un tube à gaz se comportait justement comme un tel circuit avec cette différence que sa résistance dépend de la pression. Lorsque celle-ci est supérieure à 50 baryes, la décharge y est continue et la caractéristique statique est analogue à celle de l'arc (1) à savoir une courbe décroissante caractérisant une résistance négative $\left(\frac{d\,V}{d\,I} < 0\right)$. C'est pour ces pressions que la caractéristique dynamique est parcourue dans les sens des aiguilles d'une montre. Lorsque la discontinuité de l'émission cathodique apparaît $\frac{d\,V}{d\,I}$ est au contraire positif. On peut alors alimenter le tube directement sur une batterie d'accumulateurs ou de condensateurs sans interposer de résistance ohmique $\left(\frac{d\,V}{d\,I} > 0\right)$ en série.

Wertheimer ne put observer cette discontinuité, par suite de la méthode qu'il utilisa, mais son apparition coïncide certainement avec le renversement du sens de parcours de l'ellipse. La déformation de celle-ci s'atténue d'ailleurs lorsque la pression décroît car la résistance tend à devenir constante. Wertheimer a pu déduire de ses mesures la valeur approchée de la capacité du tube étudié. Il trouva $0{,}15.10^{-3}$ μ F.

Le procédé de choix pour l'étude oscillographique de la tension est sans conteste la méthode électrostatique. Ho et Koto (2) ont construit un oscillographe de ce type qui ressemble à celui de Duddell en ce sens qu'il comporte aussi un équipage bifilaire portant un miroir, mais les deux brins sont isolés et portés à des potentiels symétriques constants de quelques centaines de volts au moyen d'une batterie. L'équipage est placé dans le champ électrique variable à analyser produit au moyen de deux plateaux. L'appareil supporte directement 4.000 volts. Les tensions plus élevées doivent être partagées entre des condensateurs.

Taylor Jones (3) a enfin décrit un oscillographe électrostatique unipolaire susceptible de supporter plus de 300 k V. Il se compose d'un ruban de bronze tendu par un ressort et une vis de réglage, immergé dans l'huile en face d'un plateau attractif encapuchonné dans un manchon d'ébonite. Le ruban porte en son centre un miroir triangulaire dont la pointe repose sur

(1) On se reportera pour l'étude de la décharge électrique dans les gaz sous les pressions élevées à la *Conférence-rapport* de M. Maurice LEBLANC fils *l'Arc électrique*.
(2) *Proc. Phys. Soc. London* (déc. 1913).
(3) *Phil. Mag.*, p. 238 (août 1907).

une tige d'ébonite de hauteur réglable. Lorsqu'une différence de potentiel élevée est appliquée entre la plaque et le ruban, celui-ci est attiré et le miroir tourne d'un petit angle, proportionnel au carré de la différence de potentiel — comme dans le montage idiostatique de l'électromètre à quadrants. L'appareil a l'inconvénient de redresser les inversions du champ mais sa capacité est très petite. Taylor Jones l'a utilisé pour ses recherches

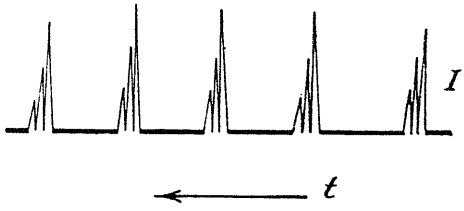


Fig. 55.

Forme de la décharge dans un tube à gaz de dureté moyenne alimenté par un inducteur. Soupape cathodique en série. Fréquence : N = 100 p. : sec.

sur la bobine d'induction et pour étudier les variations du potentiel pendant la décharge entre les bornes d'un tube à afflux alimenté par un inducteur. Il est fort regrettable que ce travail n'ait pas été complété par l'étude oscillographique simultanée du courant traversant le tube.

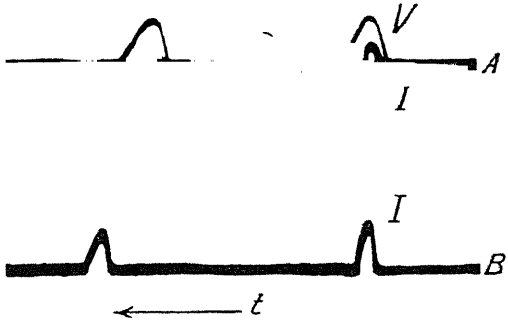


Fig. 56.

A. Tube à gaz très « dur » sur bobine sans condensateur. Tension : V_{max} = 38 kV. ; intensité : I_m = 0,6 m. A ; fréquence : N = 30 p. : sec.

B. Tube à gaz de dureté moyenne dans les mêmes conditions d'excitation. I_m = 2 m. A. N = 30 p. : sec. (V_{max} = 45 k V.).

2. Forme de la décharge dans les tubes à gaz. — L'auteur (1) a fait une étude systématique de la forme de la décharge dans les tubes à afflux et à cathode Coolidge alimentés par des tensions pulsatoire, sinusoïdale et constante.

L'appareil utilisé était un oscillographe bifilaire double de Blondel, les

(1) *Rev. Gen. Electr.*, t. 1, p. 443 (mars 1917).

ondes de tension étant étudiées comme l'avait fait Duddell. La discontinuité de l'émission cathodique apparaissait nettement au-dessous d'une certaine pression dans le tube à gaz et elle était exagérée, dans le cas de l'onde

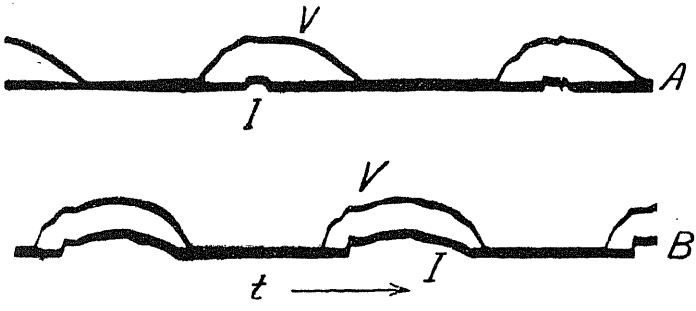


Fig. 57.

A. Tube à gaz résistant sous tension sinusoïdale. $V_{max} = 24$ kV. ; $I_m = 0{,}6$ m. A. N = 50 . p: sec.

B. Tube à gaz très « mou ». $V_{max} = 32$ kV. ; $I_m = 3$ m. A. ; N = 50 p. : sec.

de tension pulsatoire, par l'introduction dans le circuit d'une soupape cathodique de Villard (voir fig. 55) ou par l'augmentation de capacité du condensateur de Fizeau. Le cliché précédent montre ainsi une succession de décharges analogues à celles observées par Duddell (la durée de l'éruption est ici de 10^{-3} sec.). Pour mettre hors de doute le caractère de cette discontinuité le condensateur fut mis hors circuit. La figure 56 représente à la fois les ondes de tension et d'intensité obtenues dans ces conditions. La décharge

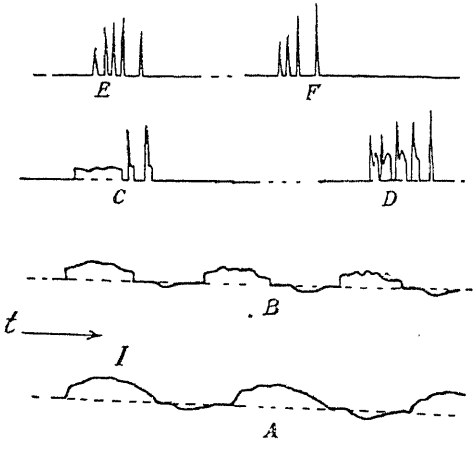


Fig. 58.

Tube à gaz soumis à une tension sinusoïdale alternative et durcissant rapidement. Le courant inverse est figuré *au-dessus* de la ligne zéro.

est encore nettement fragmentée et *n'a lieu que pour la crête extrême de tension, c'est-à-dire que les rayons cathodiques produits sont homogènes.*

Dans le cas d'une onde sinusoïdale, on observe encore une décharge continue lorsque la pression est élevée. Elle se fragmente et se localise vers la crête dès que le tube durcit (voir fig. 57). Le cliché de la figure 58 est suggestif à cet égard. Dans cette expérience, le tube à gaz a été directement alimenté par le transformateur. Il était parcouru par un courant inverse considérable et durcissait ainsi très vite — aussi les clichés A, B, C, D, E, F, furent-ils pris en succession rapide. Le premier montre que le tube (Pilon O. M.) est beaucoup moins résistant dans le sens inverse que dans le sens direct, il fonctionne alors comme une soupape. Dès qu'il durcit (B) il s'allume et se désamorce sous des tensions de plus en plus élevées. En C le courant direct a complètement disparu et l'émission discontinue apparaît dans le sens inverse. L'amplitude des éruptions isolées est plus grande parce que la tension augmente brusquement dès que le tube s'éteint. Les oscillogrammes E et F montrent la forme de la décharge finale dans le sens inverse.

Si l'on étudie la caractéristique statique d'après ces oscillogrammes, on trouve que l'inducteur produit des cycles analogues à ceux observés par Wertheimer mais beaucoup plus déformés. L'amorçage et l'extinction en particulier sont bien plus brusques. La décharge continue de la figure 57 donne un cycle analogue parcouru en sens inverse en accord avec les résultats de Wertheimer. C'est donc l'onde d'inducteur à front raide fournie par les inducteurs qui convient le mieux pour l'alimentation des tubes à gaz. C'est celle qui les allume le plus régulièrement lorsqu'ils sont très résistants. Pour obtenir des résultats approchants avec une onde sinusoïdale, il est nécessaire d'utiliser un contact tournant dont les secteurs de commutation sont réduits à des pointes (1). Il serait sans doute encore préférable de les remplacer par des sphères et de munir d'électrodes de même forme le commutateur rotatif. Mais l'onde d'inducteur a une forme variable peu favorable à la normalisation. On a cherché à alimenter l'inducteur par une onde asymétrique produite par un dispositif mécanique invariable remplaçant l'interrupteur. Beeton et Taylor (2) ont montré que la forme de l'onde fournie par un alternateur pouvait être modifiée par l'emploi d'un commutateur dénommé « injecteur » qui introduisait dans le circuit, à intervalles réguliers, une inductance, une capacité ou les deux simultanément. M. Villard a aussi proposé un 1911 un alternateur donnant une force électromotrice asymétrique.

On a cherché à utiliser une onde sinusoïdale de fréquence élevée, de

(1) R. MORTON, *The Inst. Electr. Eng.* (février 1920).
(2) *Electrician* (juin 1895).

manière à faciliter l'allumage du tube, un kénotron étant inséré dans le circuit. On trouve, d'une manière générale, qu'un tube fonctionne convenablement dans ces conditions lorsque la fréquence est de l'ordre de 500 périodes.

La tension constante ne convient nullement à l'alimentation des tubes à gaz. L'amorçage est difficile et le fonctionnement irrégulier. La décharge

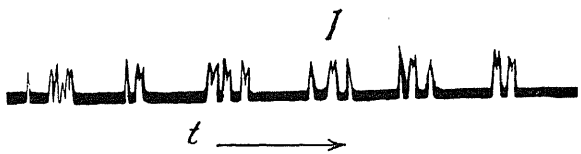


Fig. 59.

Forme de la décharge dans un tube à gaz résistant soumis à une tension constante (V = 36 kV.). Intensité : I_m = 1,25 m. A. (Rayons cathodiques *homogènes.*)

est toujours discontinue lorsque la pression du gaz est assez réduite et les éruptions cathodiques ont lieu par groupes irréguliers, comme l'ont montré Broca et Delon [1] en analysant, au moyen de l'oscillographe à fer doux de Blondel, la forme du courant produit par une tension constante élevée, obtenue au moyen de l'appareil de Delon (figure 89). Notre oscillogramme de la figure 59 représente ce mode de décharge. Pour obtenir des rayons

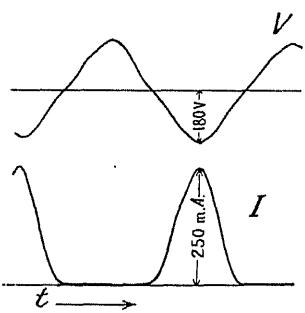


Fig. 60.

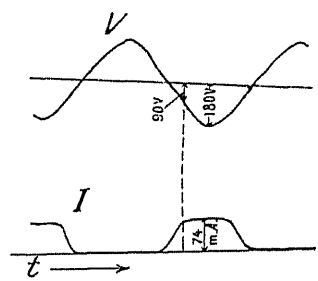


Fig. 61.

cathodiques homogènes, il faut avoir soin de ne pas intercaler de résistance dans le circuit du tube à cause de la *capacité* notable de celui-ci.

3. Forme de la décharge dans les tubes Coolidge. — Les tubes à cathode Coolidge donnent lieu à des modes de décharge plus simples. Dans le cas d'un kénotron fonctionnant normalement on observe, sous tension sinusoï-

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 336 (avril 1910).

dale, une courbe de courant qui est une sinusoïde déformée par la loi en $V^{3,2}$. Il n'y a pas saturation comme le montre l'oscillogramme de la figure 60 dû à Dushman (1). Si la température est assez basse pour provoquer la saturation, comme cela a toujours lieu dans le tube Coolidge, on obtient le mode de décharge représenté sur la figure 61. Le courant atteint sa valeur limite

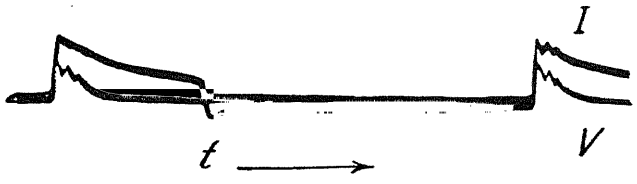


Fig. 62.

Tube Coolidge fonctionnant sur inducteur. $V_{max} = 40$ kV. ; $I_m = 7$ m. A. ; N = 30 p. : sec.

pour une tension très basse et en devient tout à fait indépendant pour les valeurs supérieures.

L'auteur a retrouvé des effets analogues en étudiant le fonctionnement du tube Coolidge sur bobine et sur transformateur. Le cliché de la figure 62 montre que l'intensité du courant ne décroît que peu lorsque la tension passe d'une valeur très élevée à une valeur insignifiante. Le courant dure pratiquement pendant toute la période d'ouverture. Ce cliché a été pris avec une capacité notable en dérivation sur l'interrupteur. On y voit

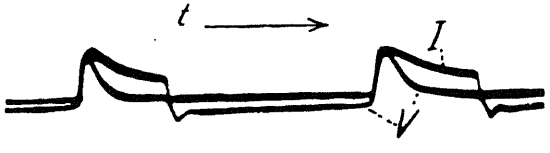


Fig. 63.

Tube Coolidge fonctionnant sur inducteur dépourvu de condensateur. $V_{max} = 40$ kV. ; $V_{eff} = 9{,}7$ kV. ; $I_{max} = 20$ m. A. ; $I_m = 7$ m. A. ; $I_{eff} = 11{,}7$ m. A. ; N = 30 p. : sec. W = 95 w.

des oscillations *en phase* de l'intensité et de la tension dues à ce condensateur. La figure 63 a, au contraire, été obtenue sans capacité. Elle montre avec une grande netteté que le tiers seulement de la quantité d'électricité débitée pendant la décharge à servi à l'excitation de rayons cathodiques rapides et, par conséquent, de rayons X pénétrants. Les deux autres tiers, débités sous de faibles tensions, ne donnent lieu qu'à un effet thermique nuisible à l'anticathode.

L'oscillogramme précédent a été obtenu avec un débit moyen, assez consi-

(1) *Gen. Electr. Rev.* (*loc. cit.*) (1915).

dérable, d'une dizaine de milliampères. La figure 64 montre la forme du courant lorsqu'on réduit cette intensité ($I_m = 3,5$ m. A). Le palier a conservé sa valeur maxima d'une trentaine de milliampères mais il ne dure plus que le tiers de la période d'ouverture, ce qui indique que l'onde de tension a été beaucoup plus brève. Ces clichés donnent ainsi l'explication d'un phénomène d'abord signalé par Schall (1) puis par Lévy (2) et que l'on constate lorsqu'on alimente un tube Coolidge par un inducteur. Ces expérimentateurs ont observé que, dans ces conditions, l'intensité du rayonnement Röntgen émis demeurait invariable lorsque l'intensité moyenne du courant traversant le tube passait de 2 à 17 m. A, sous la même tension maxima. L'onde de tension s'allonge en effet de plus en plus, car le fer se démagnétise d'autant plus lentement qu'on le fait travailler à une induction plus élevée. Cette limite de

Fig. 64.

Décharge d'inducteur de faible intensité dans un tube Coolidge : $I_m = 3,5$ m. A. ($V_{max} = 45$ k V.).

2 m. A moy. n'est d'ailleurs valable que pour un petit inducteur. Les plus gros actuellement en usage reculent cette intensité vers 3 ou 4 m. A moy. et plus.

Ces considérations ont été récemment vérifiées par des mesures d'intensité et des relevés oscillographiques dus à E. A. Owen et K. Bowes (3). L'intensité du courant traversant un tube à gaz ou un tube Coolidge alimenté par un inducteur était mesurée par un oscillographe de Duddell tandis que la tension l'était par un oscillographe de Taylor-Jones. Ces mesures ont montré que l'intensité du rayonnement Röntgen fourni par le tube Coolidge était sensiblement proportionnelle à l'*intensité maxima* du courant le traversant comme on peut en effet le prévoir théoriquement.

Un autre phénomène d'apparence anormale signalé par S. Russ (4) s'observe encore lorsqu'on fait fonctionner un tube Coolidge sur un inducteur. Si l'on porte le filament à une température élevée invariable, la tension aux bornes du tube étant très faible, on peut y faire passer une assez grande

(1) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 12, p. 74 (juillet 1916).
(2) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 13, p. 13 (janvier 1917).
(3) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 19, p. 1 (avril 1923).
(4) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 2, p. 42 (avril 1915).

intensité de courant, par exemple, une dizaine de milliampères. On remarque alors, en élevant la tension, par réduction de la résistance primaire en série, que cette intensité diminue rapidement jusqu'à une faible valeur correspondant à un régime stable. La cause de cet effet est la même que précédemment : la bobine est tout d'abord presque mise en court-circuit par le tube et le courant présente une grande intensité parce qu'il dure pendant toute la période d'ouverture (voir fig. 62). Puis la force électromotrice induite devient plus brève dès que le courant magnétisant augmente, causant une diminution de l'intensité moyenne. C'est encore à l'inégale durée des forces

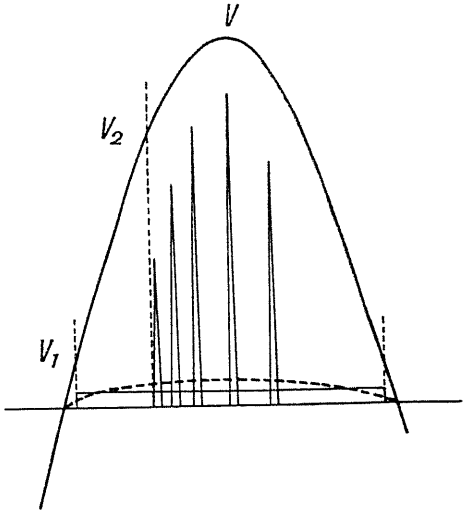


Fig. 65.

électromotrices induites à la fermeture et à la rupture qu'il faut attribuer le fait que, pour une même température du filament, l'intensité du courant est plus grande avec la première qu'avec la seconde.

L'inducteur, qui convient si bien aux tubes à afflux résistants, n'est donc nullement adapté aux tubes Coolidge et l'on ne parvient avec ces derniers (par exemple, avec les appareillages à 200 kV. nécessités par la thérapie pénétrant) à obtenir des résultats approchants qu'en augmentant la puissance dépensée. Le tube à cathode incandescente est, en effet, plus robuste que le tube à gaz.

Cet inconvénient se retrouve si l'on substitue une tension sinusoïdale à la tension pulsatoire, lorsqu'on fait fonctionner, par exemple, directement un tube Coolidge à anticathode refroidie sur un transformateur. La figure 65, construite d'après les oscillogrammes précédents, montre ce

qui se passe dans ce cas, comparativement à la même intensité moyenne de décharge dans un tube à afflux résistant : Le tube Coolidge s'allume sous une très faible tension V_1, puis l'intensité du courant demeure sensiblement invariable pendant toute la durée de l'alternance. Le tube à afflux s'amorce, au contraire, sous une tension élevée V_2 : il se produit quelques éruptions cathodiques, puis le tube s'éteint. Si les deux ampoules fonctionnent dans des conditions apparemment semblables, c'est-à-dire sous la même tension de crête V et avec la même intensité moyenne de

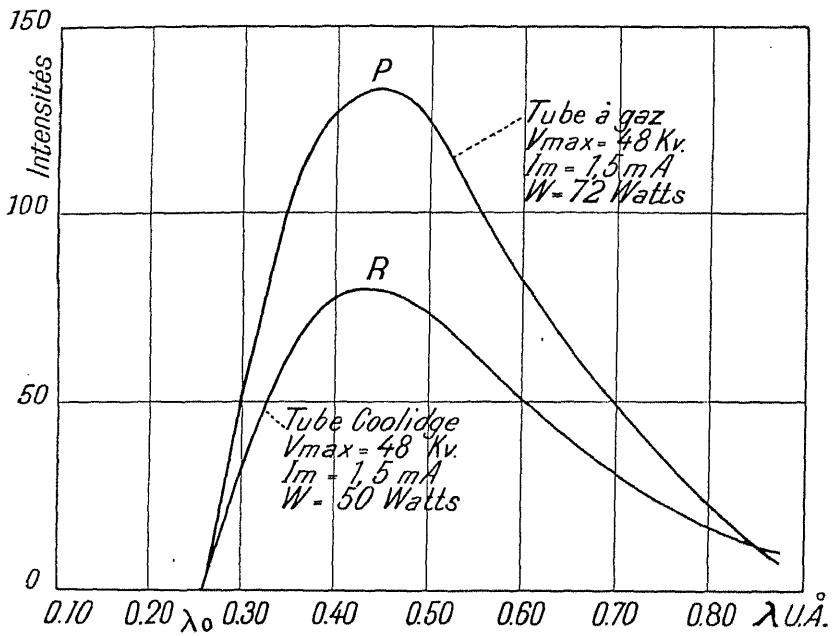


Fig. 66.

courant, l'aire du rectangle est égale à celle des petits triangles représentant les éruptions. On voit alors que les rayons cathodiques produits dans le premier cas seront beaucoup plus hétérogènes que ceux excités dans le second.

Ces considérations indiquent que les spectres des rayonnements Röntgen correspondant aux formes de décharge illustrées par les figures 57 (A) et 61 doivent différer non seulement en intensité, mais aussi en nature. Un tube à gaz résistant alimenté par une onde de tension sinusoïdale doit donner naissance à un rayonnement plus intense et plus homogène que ne le fait un tube à cathode Coolidge alimenté par la même onde. Ces prévisions ont été vérifiées par les mesures spectrométriques de l'au-

teur (1). La figure 66 représente, par exemple, deux spectres obtenus dans les mêmes conditions électriques d'excitation (48 kV. max. 1,5 m. A moy.) avec un tube à gaz (tube Pilon OM, courbe P) et un tube Coolidge à radiateur (courbe R), les foyers en tous points semblables étant observés dans les mêmes conditions. (La tension maxima décelée par le spintermètre placé entre les bornes du tube à gaz indiquait 52 kV., pour des raisons que nous exposerons plus loin, mais la tension réelle, indiquée par la plus courte longueur d'onde était bien de 48 kV.)

Les courbes ont été corrigées de la superposition des ordres de réflexion. On voit que, dans ces conditions apparemment identiques, le tube à gaz donne une intensité globale de rayonnement, 1,7 fois plus grande, abstraction faite des qualités différentes puisque les courbes se coupent vers $\lambda = 0{,}85$ Å. La puissance électrique dépensée dans le tube Coolidge était de 50 watts. Elle atteignait 70 watts dans le tube à gaz. A puissance électrique égale, le second donne donc 1,2 fois plus de rayonnement. Nous verrons plus loin que ce rendement correspond à la production d'un faisceau cathodique tout à fait homogène si l'on admet que 20 % de l'énergie est dépensée à la cathode.

Un tube à gaz résistant donne donc un faisceau cathodique homogène même sous une tension variable, et, pour obtenir un rendement équivalent avec un tube Coolidge, il est nécessaire de l'alimenter sous tension *constante*. Les redresseurs mécaniques synchrones améliorent déjà sensiblement la décharge en réduisant la partie utilisée de l'onde de tension à une région d'autant plus voisine de la crête que l'angle de commutation est plus petit et que l'étincelle d'allumage et l'arc d'extinction sont mieux évités. Mais la solution idéale consiste à utiliser une tension non seulement constante en amplitude, comme une force électromotrice crénelée, mais aussi constante dans le temps. Nous verrons en effet que les mesures électriques sont considérablement facilitées par ce mode d'alimentation. Le filament doit aussi, pour le même débit moyen, être porté à une température moins élevée, ce qui accroît sa durée. L'anticathode acquiert sa pleine puissance, car le temps mort existant entre les décharges disparaît et sa conductibilité thermique est mieux utilisée. L'effet percutant destructeur des grandes densités instantanées est enfin évité.

On peut se rendre compte *a priori* du gain que l'on réalise au point de vue de l'intensité globale du rayonnement émis lorsqu'on substitue une tension constante à une tension sinusoïdale dans les mêmes conditions électriques apparentes d'excitation, c'est-à-dire : égalité des tensions maxima

(1) *Annales de Physique*, t. 13, p. 49-134 (mars-avril 1920).

et des intensités moyennes de courant. Décomposons par la pensée la durée de la décharge correspondant à un quart d'alternance en dix éléments de temps très courts pendant lesquels la même quantité d'électricité

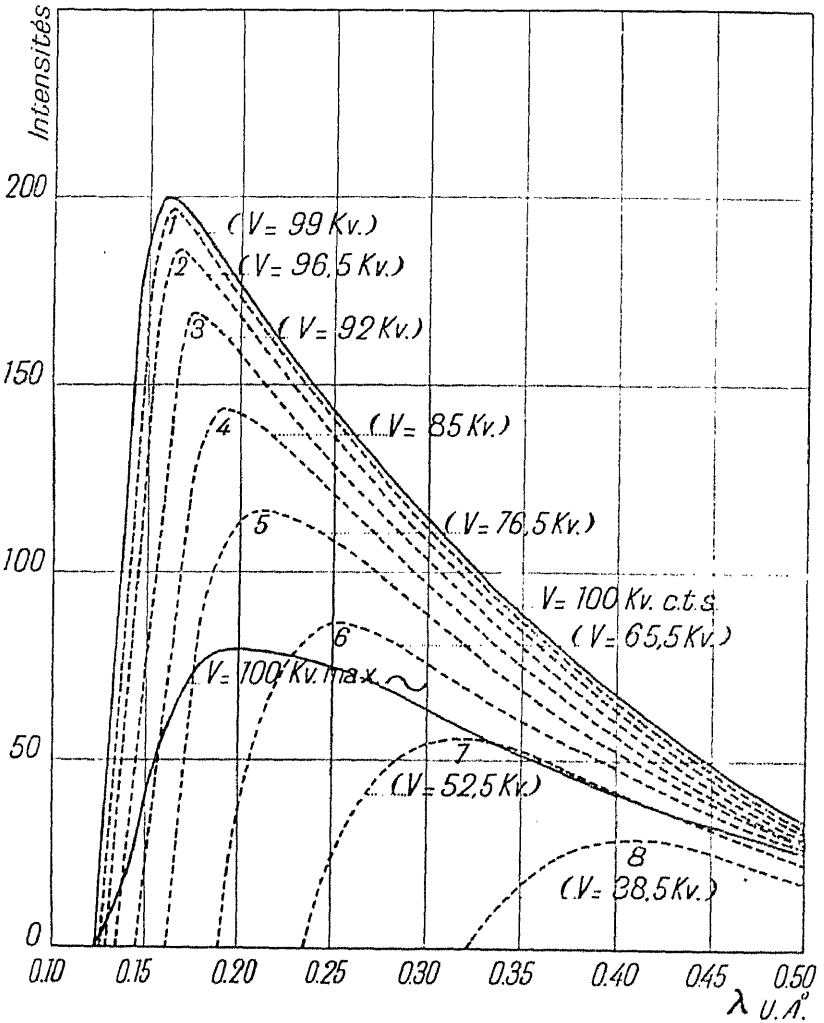


Fig. 67.

sera débitée sous une tension progressivement croissante, que nous supposerons constante et égale à une valeur moyenne pendant chacune des décharges partielles. Nous pouvons, pour chacune d'elles, construire la courbe spectrale correspondante en utilisant les lois connues (relation

du quantum, déplacement du maximum, etc.) (1) et, en ajoutant leurs ordonnées, nous aurons le spectre du rayonnement cherché.

C'est ce que nous avons effectué sur la figure 67 dans laquelle les huit spectres en pointillé représentent à une échelle décuplée les huit rayonnements élémentaires successifs correspondant aux plus hautes valeurs moyennes de la tension. Les deux premiers seraient de si grandes longueurs d'ondes qu'ils ne prennent pas place sur le graphique. Les deux courbes en trait plein représentent : l'une, le rayonnement correspondant à une tension constante égale à la tension de crête (100 kV.), l'autre, le rayonnement cherché. On remarque que la plus courte longueur d'onde est la même mais que le maximum spectral retarde, dans le cas de la tension variable, d'une quantité voisine de 0,04 Å et que les proportions en rayons de courtes et de grandes longueurs d'ondes, de même que les aires, diffèrent beaucoup. La tension constante produit globalement 2,2 fois plus de rayonnement que la tension variable, abstraction faite des qualités différentes. Mais la puissance dépensée dans le second cas est plus petite que celle mise en jeu dans le premier, comme nous le verrons plus loin, le coefficient de proportionnalité étant $\frac{1}{\sqrt{2}}$, si bien que, pour obtenir la *même énergie globale* en rayons X non filtrés sous tension sinusoïdale que sous tension constante, il faut au total dépenser dans le tube $\frac{2,2}{\sqrt{2}} = 1,5$, soit moitié plus de puissance électrique.

Cette différence est fortement accrue par la filtration que l'on fait subir au rayonnement avant de l'utiliser ou par celle qui s'exerce naturellement dans le milieu irradié. On trouve (2) par exemple qu'il faut sous 50 kV poser cinq fois plus avec l'alternance complète et trois fois plus avec le tiers de l'alternance (contact-tournant) que sous tension constante pour obtenir des radiographies identiques.

Sous 100 KV et avec un filtre de cuivre de 2 mm. d'épaisseur, le coefficient 2, 2 obtenu plus haut, devient, comme l'expérience nous l'a montré, égal à 2,6 pour une onde sinusoïdale complète. Avec un gros inducteur ce coefficient est égal à 1,85. Ces rapports sont conservés sous 200 KV.

C'est pour ces raisons que nous avons recommandé (3) dès l'apparition du tube Coolidge, de faire fonctionner cet appareil sous une tension

(1) On se reportera, pour tout ce qui concerne la physique des rayons X, à l'ouvrage de M. M. DE BROGLIE, *les Rayons X* appartenant à cette série de *Conférences-Rapports* et à *la Physique des Rayons X* de R. LEDOUX-LEBARD et A. DAUVILLIER, 1 vol. 441, p. 152, fig., Gauthier-Villars, éd. (1921).

(2) R. LEDOUX-LEBARD et A. DAUVILLIER, *C. R.*, t. 173, p. 382 (août 1921).

(3) R. LEDOUX-LEBARD et A. DAUVILLIER, *C R.*, t. 162, p. 405 (mars 1916).

constante. Ce tube, qui était mis en état d'infériorité par rapport à celui de Lilienfeld, lorsqu'on l'alimentait sous une tension variable, reprend ainsi la première place en atteignant la perfection.

Cette question a cependant été fort discutée. Rutherford, Barnes et Richardson (1) analysant par la méthode d'absorption dans l'aluminium le rayonnement d'un tube Coolidge soumis, soit à une tension constante

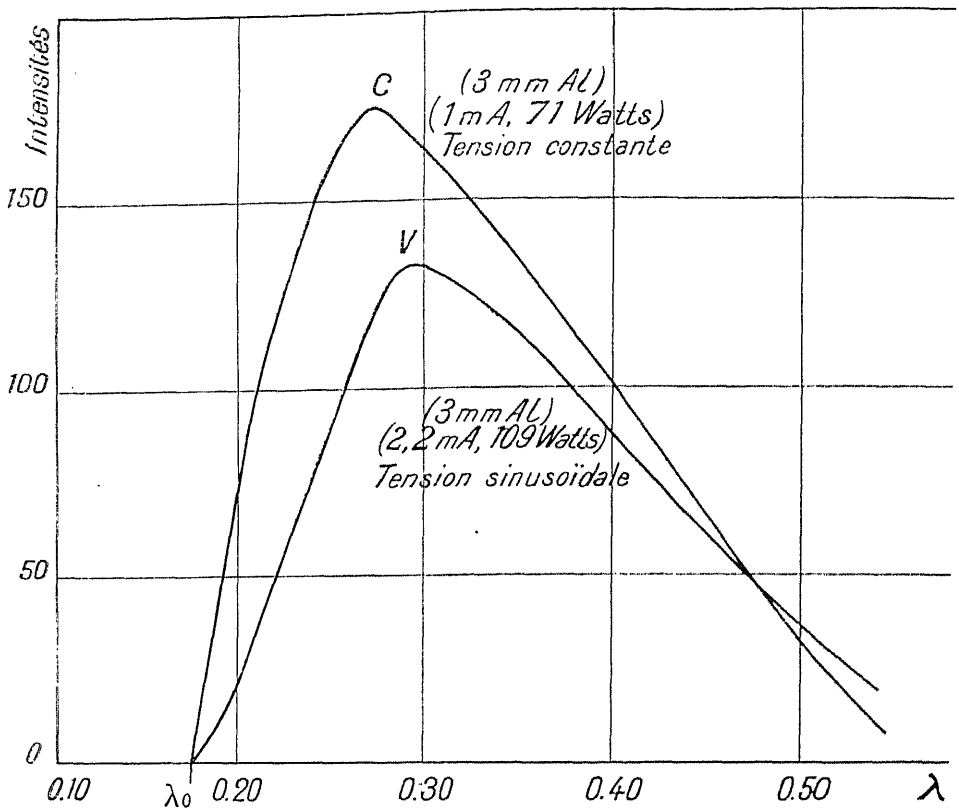


Fig. 68.

atteignant 100 kV. (machine statique), soit à une tension pulsatoire de même valeur maxima, observèrent des courbes d'absorption identiques qui auraient démontré des répartitions spectrales analogues. Ce résultat que nous avons retrouvé avec un filtre de cuivre, est dû à l'insuffisante sensibilité analytique de la méthode d'absorption. L'onde sinusoïdale complète donne cependant une courbe d'absorption légèrement différente.

(1) *Phil. Mag.*, t. 30, p. 339 (sept. 1915).

Des tensions constantes variant du simple au double (100 KV et 200 KV), donnent, par exemple, des courbes d'absorption différant seulement dans le rapport de 19 à 34 pour 2 mm. de cuivre.

La première étude spectrométrique sur ce sujet est due à Hull [1] qui, étudiant seulement des rayonnements non filtrés, a négligé le léger déplacement du maximum (0,04 Å) signalé plus haut et a admis que l'on obtenait le même spectre avec 1 m. A constant ou 1,5 m. A moy. variable, lorsque la tension de crête était la même. Lilienfeld [2], sans étudier du reste expérimentalement le rayonnement que l'on obtient sous tension constante, a vivement critiqué notre recommandation. March [3] a aussi récemment montré par le calcul — en mettant en équation les courbes spectrales obtenues par Ulrey (*loc. cit.*) sous tension constante et en les appliquant au cas d'une tension variant d'une manière sinusoïdale — que la substitution d'une tension variable à la tension constante ne s'ac compagnait d'aucune déformation notable du spectre. Cet auteur pense donner une interprétation physique de ce résultat en faisant remarquer que l'émissivité de l'anticathode croissant comme le carré de la tension instantanée, ce sont seules les valeurs de cette dernière, voisines de la crête, qui sont efficaces pour la production du rayonnement. Cependant, pour se faire une idée juste sur cette importante question, ce ne sont pas les spectres primitifs qu'il convient de comparer, mais ceux qui résultent d'une filtration notable, puisque ce seront seulement ces derniers qui subsisteront dans le milieu irradié.

Cette étude a été effectuée au spectromètre par l'auteur avec ce résultat que les spectres filtrés obtenus sous tension constante apparaissaient beaucoup plus intenses que ceux excités sous tension variable, que celle-ci soit sinusoïdale ou pulsatoire. A titre d'exemple, la figure 68 montre deux courbes expérimentales relevées avec un tube Coolidge, l'une C sous la tension constante de 71 kV. — l'autre V sous la même tension de crête sinusoïdale — et toutes deux filtrées par 3 mm. d'aluminium. L'intensité du courant, était de 1 m. A dans le cas de la tension constante, et de 2,2 m. A dans celui de la tension variable, ces valeurs correspondant, d'après ce que nous avons vu plus haut, aux équivalences spectrales. On voit que les courbes ne présentent déjà plus la même aire.

La figure 69 montre aussi trois spectres ayant été relevés l'un, sous tension constante (46 kV.) avec 1 milliampère (courbe B), les deux autres

(1) *Am. Journ. of Röntg.*, t. 2, p. 893 (déc. 1915).
(2) *Forts. a. d. Geb. d. Röntg.*, t. 25, p. 77 (nov. 1917).
(3) *Annalen der Physik*, t. 65, p. 449 (1921).

sous tension variable (46 kV. max.) avec 3 m. A moy. (tension sinusoïdale : courbe C ; tension pulsatoire : courbe A). Les ordonnées maxima des deux premières (B et C) vérifient encore le rapport théorique 2,2 mentionné plus haut et l'on voit que celui reliant les tensions pulsatoire (petit inducteur) et constante est ici encore plus grand et égal à 3 puisque les courbes A et B ont sensiblement la même amplitude. On remarque que les spectres obtenus avec l'alternance sinusoïdale et l'onde d'inducteur ont la même forme et correspondent à des rayonnements, filtrés ou non, de même qualité. Au contraire, la courbe obtenue sous tension constante montre une plus grande richesse en rayons de courtes longueurs d'ondes et moins de

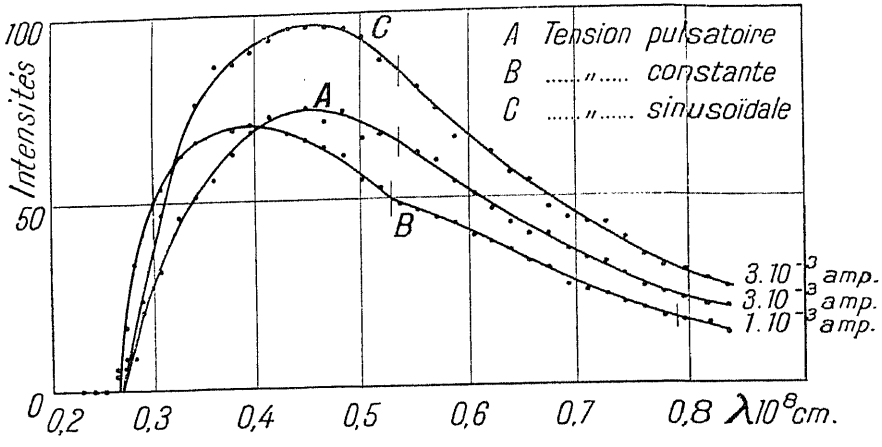


Fig. 69.

rayons de grandes longueurs. Son maximum avance ici de 0,06 Å. La puissance dépensée sous tension constante était de 47 kV. × 1 m. A = 47 watts et, sous tension sinusoïdale, de 46 kV. × 3 m. A moy. × 0,7 = 97 watts. Le rapport des puissances vérifie exactement le chiffre 1,5 que nous avions établi théoriquement plus haut, lorsqu'on ramène le spectre « sinusoïdal » à la même ordonnée maxima que le spectre « constant ».

La puissance dépensée par l'inducteur ne peut ici se calculer *a priori*, mais elle peut s'obtenir à partir des valeurs efficaces de l'intensité et de la tension ; elle atteignait, dans cet exemple, 75 watts pour la *même énergie globale* irradiée, mais non la même *qualité* de rayonnement. Cette puissance était donc presque équivalente à celle dépensée par le transformateur à courant alternatif (70 watts pour 2,2 m. A moy.).

Ces rapports ont été confirmés théoriquement depuis par Behnken (1)

(1) *Zeitsch. für Techn. Physik*, t. 6, p. 153 (1921).

qui, ayant trouvé une équation représentant la forme des spectres non corrigés d'Ulrey, a calculé les déformations spectrales qu'entraîne la substitution à une tension constante, d'une force électromotrice sinusoïdale, crénelée et triangulaire (cette dernière étant une approximation de l'onde pulsatoire).

Ils ont aussi été vérifiés expérimentalement par W. Duane (1) qui a observé la même pénétration, après 0,7 mm. de cuivre (longueur d'onde effective 0,14 Å), sous une tension alternative maxima de 200 kV. et une tension constante de 165 kV. seulement. Des spectres relevés avec ces deux formes de tension, sous la même valeur de crête (68 kV.), la même intensité moyenne de courant, et après une filtration exercée par 4 mm. d'aluminium, ont confirmé les résultats mentionnés ci-dessus, à savoir que la tension constante fournissait une intensité globale double et que le maximum était déplacé du côté des courtes longueurs d'ondes.

Coolidge et Kearsley (2) ont enfin comparé récemment les rayonnements fournis par un tube Coolidge Standard pour hautes tensions lorsqu'il est successivement alimenté par un contact-tournant, un inducteur et une tension constante.La qualité du rayonnement a été définie pàr la méthode d'absorption dans le cuivre. Bien que ces mesures ne soient pas aussi significatives que le sont les résultats spectrométriques, elles sont cependant précieuses parce qu'elles ont été effectuées à de très hautes tensions. Ces auteurs ont observé qu'avec une intensité moyenne de 1 milliampère, le contact-tournant (modèle américain décrit plus loin) et l'inducteur fournissaient les mêmes courbes d'absorption jusqu'à 296 kV. max., limite des expériences, mais que la tension constante donnait, sous 200 kV., un rayonnement de même qualité que les deux générateurs à tension variable fonctionnant sous 235 kV. max.

4. Dispositifs homogénéisateurs. — On a cherché a rendre la cathode Coolidge aussi efficace sous tension variable que l'est celle d'un tube à gaz en lui donnant artificiellement le « seuil » naturel qui lui manque.

Nous avons dit que le tube Müller dit « à électrons » était muni d'une grille métallique G à larges mailles placée devant son filament F et connectée avec ce dernier à travers une grande résistance R (voir fig. 70). On reconnaît en ce montage celui d'une lampe à trois électrodes. Le potentiel négatif pris par la grille, dû à l'impact des électrons les plus rapides émis par le filament, est d'autant plus grand que la résistance est plus considérable. Les électrons cathodiques seront donc d'autant plus difficilement extraits par

(1) *Am. Journ. of Röntg.*, t. 9, p. 391 (1922).
(2) *Am. Journ. of Röntg.*, t. 9, p. 77 (février 1922).

le champ principal appliqué entre le filament et l'anticathode. Le courant aura ainsi tendance à ne passer qu'au voisinage de la crête de l'onde de tension, comme cela a lieu dans un tube à afflux. Mais, il résulte de l'adjonction de ce dispositif, que l'intensité moyenne du courant n'est plus indépendante de la tension de crête. Elle croît sensiblement avec cette dernière, si bien que toute altération de la tension nécessite un nouveau réglage de la température ramenant l'intensité moyenne à sa valeur initiale.

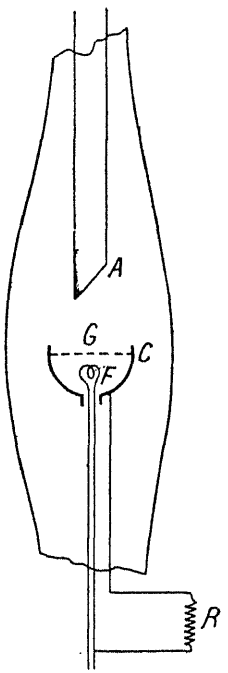


Fig. 70.

Ce dispositif ne paraît pas procurer un gain appréciable sur inducteur lorsque l'intensité n'excède pas 2 milliampères, mais il est probablement efficace pour de plus grandes intensités et surtout sous excitation sinusoïdale.

On pourrait enfin obtenir, avec une simple cathode Coolidge, l'unique passage du courant sous la tension de crête en utilisant un filament très fin, convenablement ancré, ayant une capacité calorifique assez réduite pour que sa température suive suffisamment vite les variations de la tension. Le courant de chauffage devrait alors, bien entendu, être en phase avec la tension d'alimentation.

5. Forme de la décharge dans le tube Lilienfeld. — La forme de la décharge électrique dans le tube Lilienfeld est intéressante à ce point de vue. Elle a été étudiée par Lilienfeld (*loc. cit.*). au moyen du tube oscillographique décrit plus haut et est reproduite sur la figure 71 pour une onde sinusoïdale de fréquence 50. On voit que le courant ne passe sensiblement que pendant le tiers de l'alternance et pour la crête de tension, à cause de la caractéristique en V^2 du circuit d'allumage. Ce tube joint donc, aux propriétés homogénéisantes du tube à gaz, les avantages de puissance, de stabilité et de maniabilité du tube à cathode incandescente.

Lilienfeld a cru pouvoir démontrer (*loc. cit.*) par des spectrogrammes que lorsque son tube était alimenté, sous *la même tension de crête*, par une force électromotrice sinusoïdale de fréquence croissante (50, 250 et 500 cycles), le spectre du rayonnement émis s'étendait du côté des courtes longueurs

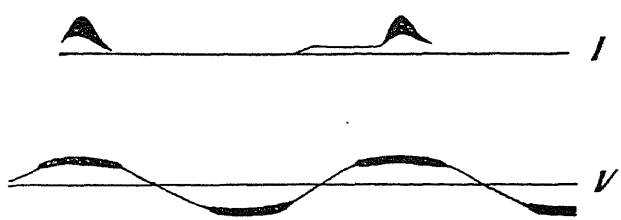


Fig. 71.

d'ondes et s'accroissait en intensité. En un mot, il obtenait sous 108 kV. max., à 500 périodes, un rayonnement qui correspondait à 171 kV. max. sous 50 périodes. C'est cette observation qui l'a conduit à la création du « Radio-Silex » dont nous décrivons plus loin le montage.

Ce phénomène surprenant et théoriquement improbable devait, s'il était vrai, se retrouver avec un tube Coolidge, puisque le tube Lilienfeld n'en diffère que par la manière dont les électrons sont *dirigés* sur l'anticathode. L'auteur (1) a, dans le but de rechercher cet effet, alimenté un tube Standard par une onde de tension sinusoïdale, de fréquence variable, dont la valeur efficace était mesurée par un voltmètre Abraham-Villard. La puissance dépensée était très faible (70 watts), afin de ne pas déformer les ondes, d'ailleurs fournies par des transformateurs de 5 kV—A commandés par auto-transformateurs. Deux spectrogrammes furent pris sur la même plaque, et exactement dans les mêmes conditions, sous 42 et 600 périodes. Les spectres obtenus se révélèrent être absolument identiques, aussi bien au point de vue de l'intensité du fond continu et des

(1) *Comptes rendus*, t. 172, p. 1033 (avril 1921).

raies K du tungstène qu'à celui de la plus courte longueur d'onde. Celle-ci correspondait au quantum de la tension maxima, les harmoniques existant sur la courbe de la tension à 600 périodes ne jouant pas un rôle notable au point de vue de l'excitation des rayons X.

Le résultat de Lilienfeld semble donc avoir été simulé par une production accidentelle d'harmoniques intenses ayant échappé à l'observation. Ceux-ci ajoutent le plus souvent, au spectre continu normal, un faible prolongement du côté des hautes fréquences, enregistré par la photographie mais ne représentant pas un excédent notable d'énergie rayonnée. L'auteur en a relevé quelques exemples au spectromètre, à des fréquences aussi basses que 60 périodes, en alimentant un tube Coolidge sur un transformateur fonctionnant sur commutatrice. Le courant d'alimentation observé à l'oscillographe Blondel accusait la superposition d'un courant de haute fréquence qui, très amplifié par le transformateur, avait une influence appréciable sur la forme de la région de plus haute fréquence du spectre.

Le tube Lilienfeld, quoique construit pour s'adapter aux tensions variables, peut d'ailleurs fonctionner avantageusement sous tension constante. Il faut alors alimenter à la fois le circuit d'allumage et le circuit principal par une force électromotrice de cette forme. On peut y parvenir, en disposant, par exemple, des condensateurs et des kénotrons dans les circuits du Radio-Silex. Mais il va de soi que, quoique atteignant alors le rendement des tubes à cathode Coolidge fonctionnant sous tension constante, l'extrême complexité de ses circuits le met en état d'infériorité marquée.

6. Conclusions. — Au point de vue pratique, nous pouvons dégager de cette étude les conclusions suivantes :

Lorsqu'il s'agit de produire des rayons Röntgen dont la qualité est d'importance secondaire, avec un montage aussi simple que possible, par exemple dans le cas des dispositifs transportables pour le radiodiagnostic ou pour l'analyse des substances cristallines, il est avantageux d'utiliser un tube Coolidge à anticathode refroidie alimenté directement par un transformateur (voir fig. 81). Au contraire, lorsque la question du rendement est d'importance primordiale, comme en spectrographie des rayons Röntgen, lorsqu'on étudie des oxydes ou des sels métalliques de faible conductibilité thermique déposés sur l'anticathode, ou en radiothérapie, lorsqu'il s'agit de faire absorber à une tumeur profonde le maximum d'énergie Röntgen sans léser les régions superficielles, il est préférable d'utiliser un tube Coolidge alimenté sous tension constante.

CHAPITRE VII

GÉNÉRATEURS DE HAUTE TENSION

Ayant examiné la forme de la décharge électrique dans les tubes à rayons X et déduit de cette étude les conclusions pratiques qui précèdent, nous allons décrire sommairement les appareils fournissant les diverses formes de tension dont nous avons envisagé les effets et les montages électriques permettant l'alimentation des tubes. Nous examinerons ainsi successivement les inducteurs, les transformateurs à courant alternatif et les générateurs de tension constante.

1. Bobines d'induction ou inducteurs. — Nous ne décrirons pas ici cet appareil dont la théorie est très complexe et dont le principe a donné lieu à de nombreux montages. Nous renverrons pour cette étude le lecteur à l'excellente monographie d'Armagnat (1) et à l'ouvrage récent de Taylor Jones (2). Nous nous contenterons d'énumérer brièvement quelques considérations se rattachant plus particulièrement à l'alimentation des tubes à rayons Röntgen.

L'oscillogramme de la figure 72 (3) rappelle l'allure générale des phénomènes dont la bobine d'induction est le siège. A la fermeture du circuit, la différence de potentiel V aux bornes du primaire est égale à la *f. e. m.* de la source — la tension du secteur par exemple — et l'intensité I du courant primaire est nulle. A mesure que la force contre-électromotrice de self-induction diminue, par suite du passage du courant, V décroît pour devenir égale, en régime permanent, à la chute ohmique, toujours très faible, dans le primaire. Il faut rompre le circuit dès que le courant limite est atteint afin de diminuer le temps perdu et d'éviter une inutile dépense d'énergie par effet Joule.

(1) ARMAGNAT, *la Bobine d'induction*, 1 vol. in-4°, 219 p., 109 fig., Gauthier-Villars, éd. (1905).

(2) TAYLOR-JONES, *The theory of the induction coil* (Pitman, éd., Londres), 1 vol. in-4°, 214 pages, 92 fig.

(3) La courbe *i* représente l'intensité du courant produit dans un tube à gaz.

La durée d'établissement du courant de fermeture est déterminée par la constante de temps du circuit. Lorsque la rupture se produit, l'énergie est emmagasinée sous forme magnétique dans le primaire. Ce circuit se trouve ensuite disposé en série avec la source — dont le rôle sera dorénavant passif — et le condensateur de Fizeau. La formule de Thomson est alors applicable et l'on obtient des oscillations, décalées d'un quart de période, de la différence de potentiel V et de l'intensité I du courant. La *f. e. m.* secondaire est à tout instant proportionnelle au produit de V par le rapport de transformation. Celui-ci est généralement voisin de 200. L'étude mathématique du phénomène montre que la *f. e. m.* secondaire est proportionnelle à l'intensité primaire maxima et inversement proportionnelle à la racine carrée de la capacité de Fizeau.

On ne peut, avec un inducteur, clore le circuit magnétique, comme cela

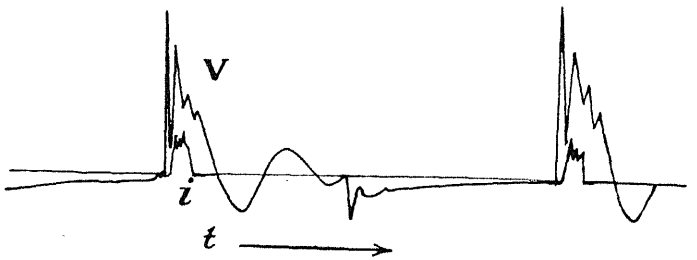


Fig. 72.

se fait pour les transformateurs à courant alternatif, car il est nécessaire que le fer se démagnétise aussi vite que possible. Lord Rayleigh et Armagnat ont cependant montré qu'un entrefer étroit, de l'ordre du vingtième de la longueur du circuit magnétique, ramenait aux conditions du noyau droit. Ce dispositif a l'avantage de réduire la réluctance du circuit. Klingelfuss a construit de puissants inducteurs de ce type.

La production d'une étincelle peu après la rupture (elle correspond au crochet visible sur la figure précédente), le rôle du fer, celui de la capacité secondaire, compliquent beaucoup la théorie de la bobine, qui constitue un problème électrique d'un grand intérêt.

On voit par l'oscillogramme précédent que V peut atteindre une valeur maxima dix fois plus grande que celle du secteur. Le circuit primaire et le condensateur doivent donc être isolés pour une tension de plusieurs milliers de volts. Les enroulements sont souvent noyés dans l'arcanson ce qui est mauvais. Un isolement meilleur est assuré, comme dans les bobines Rochefort, au moyen d'une dissolution pâteuse de paraffine dans le pétrole.

L'immersion dans l'huile est très recommandable. On a aussi construit des inducteurs à isolement dans l'air (Reiniger), bien ventilés, qui donnent toute satisfaction. On peut, bien entendu, utiliser un inducteur sur courant alternatif (1) en ayant soin de produire la rupture au moment du maximum d'intensité. Il suffit d'employer pour cela un interrupteur synchrone dont le modèle dû à Blondel est un excellent exemple.

Les seuls interrupteurs employés à l'heure actuelle sont du type à jet de mercure dans une atmosphère hydrogénée (en pratique du gaz d'éclairage). La nature du milieu gazeux dans lequel se produit la rupture est d'une très grande importance comme les expériences de A. Beclère et de Drault (2) l'ont montré.

Un excellent mode de commande imaginé par Ropiquet (3) consiste à utiliser des dents de contact de forme triangulaire pouvant se déplacer verticalement devant le jet. On peut ainsi modifier la durée du contact, et, par suite, l'intensité moyenne du courant magnétisant, et la puissance emmagasinée, sous forme inductive, dans le primaire. La commande par résistance série absorbe de l'énergie par effet Joule et crée une chute du potentiel secondaire considérable dès que le débit augmente.

Les inducteurs donnent une *f. e. m.* alternative dissymétrique dont la forme dépend beaucoup de la qualité de la rupture et des conditions électriques des circuits. L'interrupteur électrolytique, aujourd'hui abandonné, donne, par exemple, une onde de tension dont les deux alternances ont presque la même amplitude. Avec les interrupteurs mécaniques modernes la force électromotrice inverse peut, à vide, atteindre une amplitude égale à la moitié de celle de la tension maxima d'ouverture. Elle a deux origines distinctes : la force électromotrice induite à la fermeture et celle qui l'est par la décharge oscillatoire, dans le primaire, du condensateur de Fizeau. La seconde peut souvent être la plus importante, comme Duddell l'a observé et comme le montre notre oscillogramme de la figure précédente.

On a proposé, dans le but d'accroître l'intensité moyenne pouvant être débitée par l'inducteur, de redresser la première par l'emploi d'un commutateur tournant monté sur l'arbre de l'interrupteur. Cette disposition est franchement mauvaise, car le courant débité par cette onde de tension l'est sous une faible force électromotrice incapable de produire des rayons cathodiques rapides. Il faut, au contraire, éliminer cette tension inverse au moyen

(1) L'utilisation directe sur courant alternatif sans interrupteur, c'est-à-dire comme un simple transformateur à circuit magnétique ouvert, ne saurait fournir que de faibles tensions secondaires par suite du petit rapport de transformation des bobines.

(2) *Arch. Electr. Méd.*, p. 856 (1908).

(3) *Arch. Electr. Méd.*, p. 765 (oct. 1909).

d'une soupape à étincelle, comme dans le dispositif de la figure 73, d'un kénotron ou d'un contact tournant. On a cherché à réduire autant que possible la *f. e. m.* de fermeture par différents artifices. Ropiquet (1) fractionne la période de fermeture en utilisant dans l'interrupteur un contact à touches multiples isolées, introduisant en série avec le primaire des bobines de self induction d'inductances décroissantes. Dessauer (2) parvient au même résultat par l'introduction de résistances décroissantes durant le contact.

Une solution beaucoup plus originale consiste à produire, au contraire, une *f. e. m.* de fermeture très élevée — qui seule sera utilisable — en supprimant celle d'ouverture. Norton et Laurence (3) chargent, au moyen d'un commutateur tournant, une capacité de 25 microfarads sur un secteur à courant continu de 200 volts et le déchargent dans le primaire. La *f. e. m.* induite est proportionnelle à la tension de charge multipliée par le rapport de transformation, mais, la résistance du circuit étant faible, la décharge est oscillante et donne une onde inverse considérable.

La véritable solution de ce problème a été donnée par Grisson (4) qui, au moyen d'un commutateur tournant, charge une capacité de plusieurs milliers de microfarads à travers le primaire. La self induction de ce circuit étant contrebalancée par la capacité disposée en série, l'appel de courant est très brusque et il se produit au secondaire une *f. e. m.* de fermeture très élevée. La rupture se produit sans étincelle sur courant nul et ne donne lieu à aucun effet d'induction. Le condensateur est ensuite inversé pour la recharge suivante. Grisson a construit des appareils utilisés avec succès dans la technique dont le plus puissant donnait 200 kV. Le condensateur de 50.000 microfarads était du type électrolytique à anode d'aluminium et le commutateur tournait à raison de 100 tours par seconde. Il est important avec ces appareils de ne pas rompre le circuit avant la charge complète de la capacité.

Un autre système a été proposé par H. Wilson (5). Il est basé sur le fait qu'un circuit de grande inductance peut être interrompu sans étincelle si sa période oscillatoire est suffisamment grande. Ce résultat est obtenu en emmagasinant l'énergie fournie par le réseau dans une inductance couplée inductivement à un circuit oscillatoire de grande période, de telle façon qu'à l'ouverture, l'énergie inductive soit lentement transmise à un condensateur. Lorsque cette transmission est achevée, l'inductance prin-

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 349 (mai 1910).
(2) *Arch. Electr. Méd.*, p. 419 (1910).
(3) *Electr. World*, p. 327 (mars 1897).
(4) *Congrès Int. Rad. Amsterdam* (sept. 1908) et *Arch. Electr. Méd.*, p. 339 (mai 1909).
(5) *Journ. Röntg. Soc.*, t. 18, p. 143 (juillet 1922).

cipale est court-circuitée par un troisième contact et le condensateur se décharge extrêmement vite dans le primaire de l'inducteur.

Les bobines modernes, qui jouissent d'une faveur particulièrement mar-

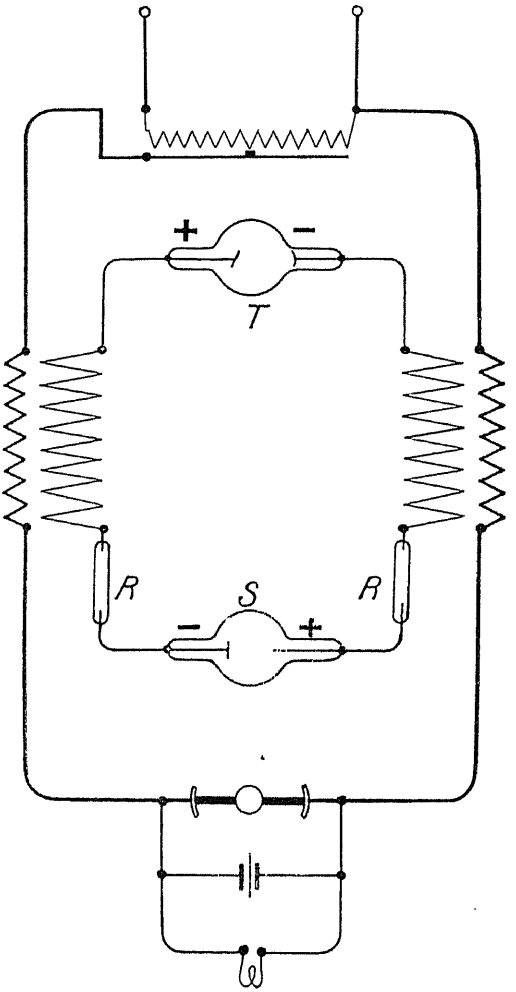


Fig. 73.

quée en Allemagne et en Grande-Bretagne sous la forme du dispositif symétrique de Reiniger, peuvent fournir, à vide, des étincelles atteignant 80 cm. de longueur entre pointes. La figure 73 schématise le montage. Les deux primaires et les deux secondaires sont disposés en série ainsi que le tube à gaz T (tube S. H. S.) et la soupape à étincelle pointe-plaque S. Cette dernière

arrête l'onde inverse et ajoute son seuil d'allumage à celui du tube, de manière à homogénéiser la décharge. Deux résistances R, constituées par des tubes d'eau distillée, protègent l'extrémité des enroulements secondaires contre les oscillations prenant naissance dans l'éclateur. Ces extrémités sont isolées du sol pour une tension correspondant à la grandeur de l'onde inverse.

La figure 1 de la Pl. III représente une des formes de réalisation de

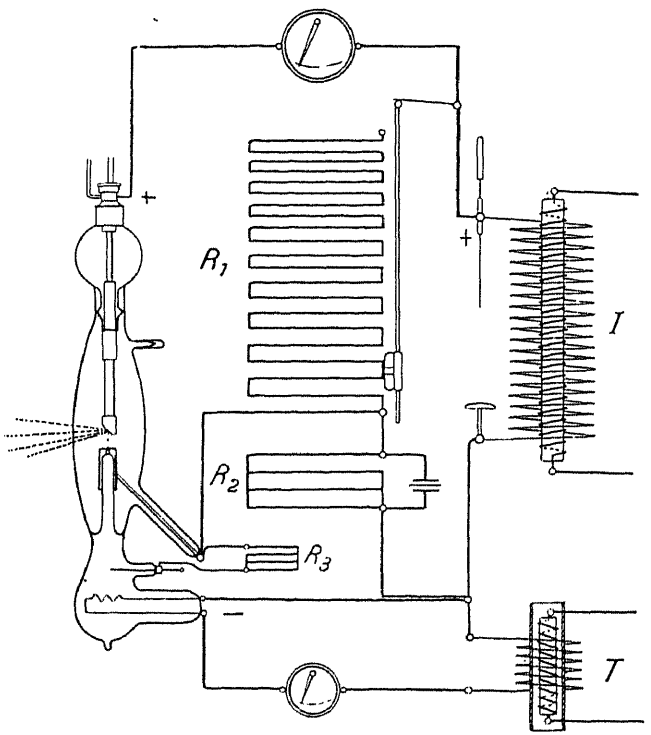


Fig. 74.

l'appareil. On remarquera l'importance donnée au condensateur de Fizeau dont la capacité atteint une dizaine de microfarads. Voltz (*loc. cit.*) a en effet remarqué, en étudiant la forme du courant de décharge de l'appareil dans le tube S. H. S., qu'une capacité de la valeur habituelle (1 à 2 microfarads) donnait naissance à 3 ou 4 éruptions distinctes lorsque l'intensité moyenne atteignait 2 à 3 m. A (voy. fig. 55), alors qu'une grande capacité donnait lieu à une éruption unique. Il en a conclu que la décharge devait être plus homogène dans le second cas. Cependant Mortimer Codd [1], analy-

(1) *Journ. Röntg Soc.*, t. 18, p. 183 (octobre 1922).

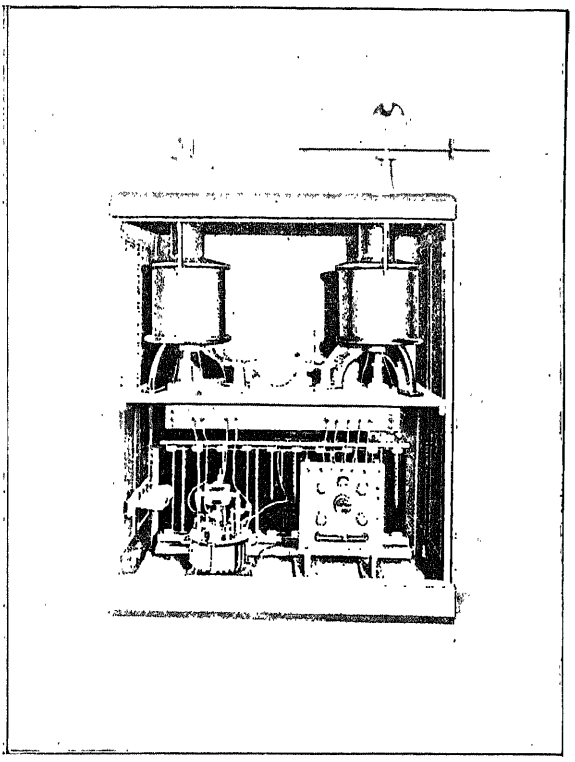
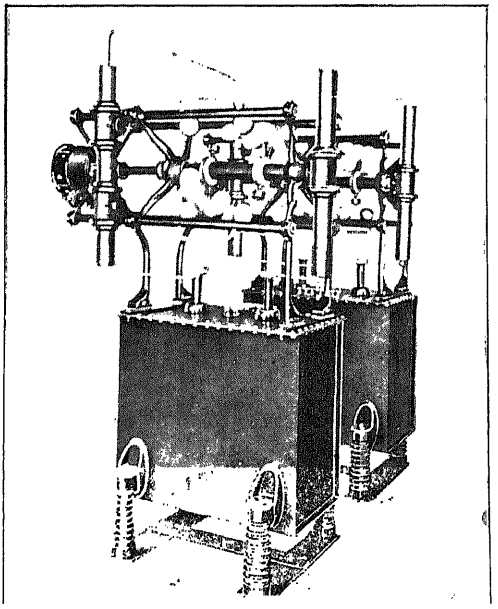


Fig. 61.



sant la forme du courant de décharge au moyen d'un oscillographe, a prétendu qu'il n'en était rien et qu'une capacité juste suffisante pour assurer une bonne rupture (½ à 1 microfarad) donnait des résultats équivalents. Il est en effet probable que, lorsque la décharge est fractionnée — par suite de la discontinuité de l'émission cathodique favorisée par des oscillations rapides se superposant à l'onde de tension — les diverses éruptions ont lieu pendant la même première demi-onde directe et seulement pour sa valeur de crête, comme le montre notre oscillogramme de la figure 72.

La figure 74 schématise le montage du tube Lilienfeld sur inducteur (1). On remarque la grande résistance réglable R_1 de 40 mégohms servant à prendre sur la différence de potentiel principale les quelques kilovolts nécessaires pour assurer le fonctionnement du circuit d'allumage. La résis-

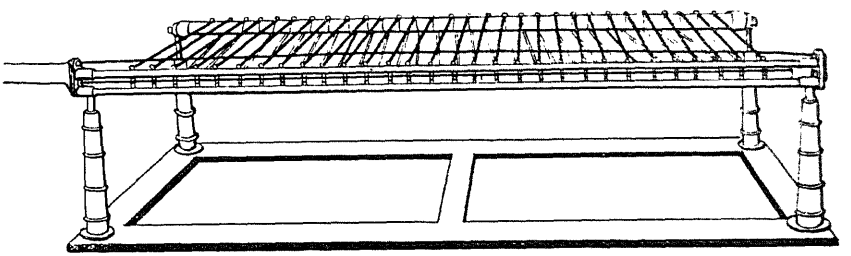


Fig. 75.

tance réglable R_2 dite « pour homogénéiser » (0,5 à 2 mégohms) permet, par shuntage de ce circuit, le fonctionnement du tube à faible intensité. La résistance R_3 fixe le potentiel de la sonde. Enfin le transformateur à courant alternatif T, à circuit magnétique ouvert, allume le filament à une température invariable. Cet ensemble compliqué a, bien entendu, un rendement déplorable.

La figure 75 représente la résistance R_1 dont il est utile de connaître le mode constructif (1) car ses éléments peuvent être d'une grande utilité pour de nombreux montages de laboratoire. Elle se compose de tubes de verre, de 50 cm. de longueur et de 1 cm. de diamètre, enduits intérieurement d'un dépôt de carbone, ensuite enlevé suivant une ligne hélicoïdale. Les contacts sont obtenus aux deux extrémités par un dépôt métallique auquel est soudé un fil scellé dans la paroi. On peut obtenir, suivant le pas de l'hélice, des résistances variables. Ces éléments supportent indéfiniment une vingtaine de watts et, momentanément, un débit de plusieurs dizaines de milliampères. Ceux de la résistance de sonde, peu encombrants, ont une vingtaine de centimètres de longueur. Leur résistance est comprise entre 200.000 ohms et 1 mégohm.

(1) LILIENFELD, *Electr. Zeits.*, t. 44 (1920).

Remarque. — Il est à remarquer que l'inducteur pourrait prendre une forme extrêmement simple si l'on savait construire un interrupteur parfait. Taylor Jones (*loc. cit.*) a calculé qu'un simple enroulement à noyau de fer ayant une self inductance de 5 henrys et une capacité de 5.10^{-5} microfarads serait susceptible de produire une *f. e. m.* atteignant 300 kV. max. par la rupture d'un courant de 1 ampère.

L'auteur a proposé, pour réaliser une rupture parfaite, de l'effectuer dans le tube Coolidge lui-même. Une forme de réalisation de cette idée est shématisée par la figure 76. Un tube à anticathode tournante du type

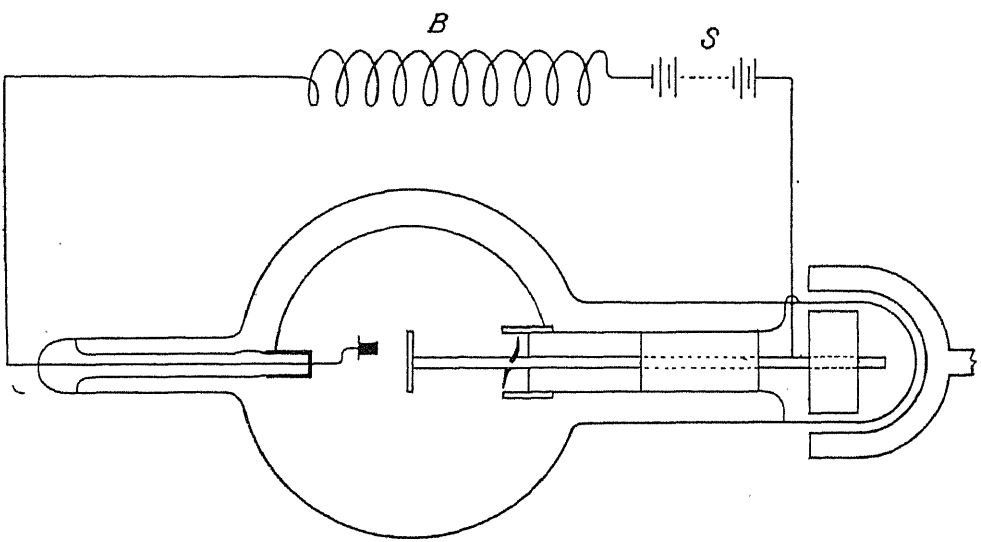


Fig. 76.

décrit page 100 est disposé en série avec la bobine à noyau de fer B et la source S. L'arbre anticathodique tournant porte un contact venant successivement frotter sur des secteurs isolés reliés à la cathode. Ces contacts peuvent se faire en tantale. Le moteur d'entraînement est, par exemple, à champ tournant et l'anticathode peut être mise au sol. La fermeture ne s'accompagne d'aucune *f. e. m.* et la rupture produit une onde utilisée par la décharge électronique. Il serait également possible d'utiliser une anticathode fixe, refroidie par une circulation d'eau, et un interrupteur disposé dans une tubulure latérale. Un tube de ce genre relié en permanence à une pompe serait avantageusement construit sous la forme métallique. Ce dispositif fournirait un moyen simple d'alimenter d'une manière par-

faitement invariable un tube à rayons X sous une tension de crête pouvant être très élevée.

2. Transformateurs à courant alternatif. — Les transformateurs à circuit magnétique fermé ont été introduits dans la technique par Villard (1) qui a proposé plusieurs montages ingénieux, basés sur l'emploi de ses soupapes cathodiques, placées, soit en série soit en parallèle avec le tube. Dans le premier cas, la soupape arrête l'alternance inverse tandis que dans le second elle l'absorbe. Dans le dispositif connu sous le nom de « meuble d'Arsonval-Gaiffe » la tension maxima fournie par le transformateur est même doublée grâce au montage suivant dû à Villard (2) (voir fig. 77).

Les deux bornes du secondaire sont reliées à deux condensateurs C_1 et C_2

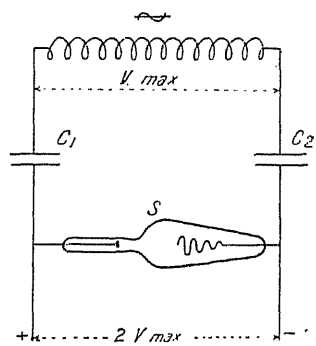


Fig. 77.

dont les deux armatures extérieures sont connectées aux électrodes d'une soupape cathodique. L'une des alternances traverse la soupape et charge les deux condensateurs en série. L'alternance suivante est arrêtée par la soupape et débite en série avec les deux condensateurs chargés chacun à la tension $V_{max}/2$. La tension aux bornes d'utilisation varie donc périodiquement entre 0 et $2\,V_{max}$ et demeure polarisée. L'emploi d'un kénotron au lieu d'une soupape rend le montage pratique, le débit étant limité par les capacités C_1 et C_2. Cet appareil a été construit (3) avec un transformateur à fuites de 60 kV. eff. et deux soupapes en série. Il est encore utilisé à l'heure actuelle et donne toute satisfaction. Il ne faut pas le confondre avec un autre montage de Villard, dont nous parlerons plus loin, et qui permet

(1) *C. R.*, t. 128, p. 994 (1899).
(2) VILLARD, *Journal de Physique*, t. 10, p. 28 (1901).
(3) *Arch. Electr. Méd.*, p. 502 (1900) et p. 534 (1904).

d'obtenir une tension constante. On peut enfin réaliser avec des soupapes cathodiques à gaz ou à cathode incandescente tous les montages classiques, tels que le pont de Wheastone à quatre soupapes et celui du redresseur bianodique à vapeur de mercure.

Delon (1) a réalisé un appareil mécanique permettant aussi de doubler la tension maxima d'un transformateur industriel (voir fig. 78). Un commutateur tournant synchrone T, animé d'une vitesse angulaire égale à la moitié de la pulsation, charge pendant l'une des alternances, un condensateur C à la tension de crête et le décharge à la suivante dans le tube A en série avec

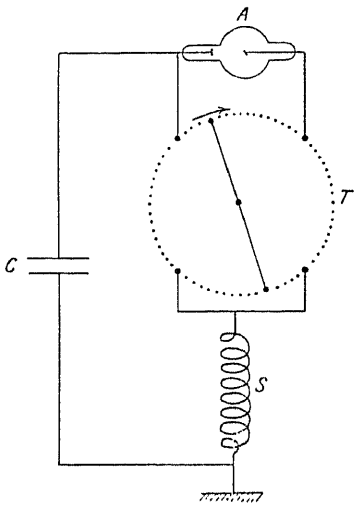


Fig. 78.

le transformateur S. Cet appareil donne une onde de tension intermittente à raison d'une décharge par période.

On a construit un grand nombre de commutateurs synchrones donnant des fractions angulaires de l'alternance de longueur variable et redressant le plus souvent l'alternance inverse, de manière à lui donner la même polarité que l'alternance directe. Cette solution, préconisée par Lemps dès 1897, n'avait cependant pu être réalisée avant Snook qui, en 1908, monta le redresseur synchrone sur l'alternateur lui-même. L'emploi de redresseurs triphasés ou polyphasés permet même d'obtenir une tension aussi constante qu'on le désire (voir page 159).

Ces appareils sont utilisés aujourd'hui pour la radiographie et, en Alle-

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 485 (1910).

magne et en Amérique, pour la thérapie. Celui construit par Dessauer utilise un principe d'étages de tension fort intéressant parce qu'il permet, au moyen d'unités moyennement isolées, de produire des différences de potentiel extrêmement élevées.

Ce montage consiste (voir fig. 79) à utiliser deux transformateurs intermédiaires T_1 et T_2, dont les primaires fonctionnent en série sur le réseau et dont le rapport de transformation est égal à l'unité. Les secondaires sont isolés, par exemple, pour 50 kV. par rapport au sol. Ils alimentent les primaires des deux transformateurs principaux T_3 et T_4 de 100 kV., dont les secondaires sont reliés en série de manière à fournir 200 kV. entre leurs extrémités. Les points milieux de ces enroulements, qui sont respective-

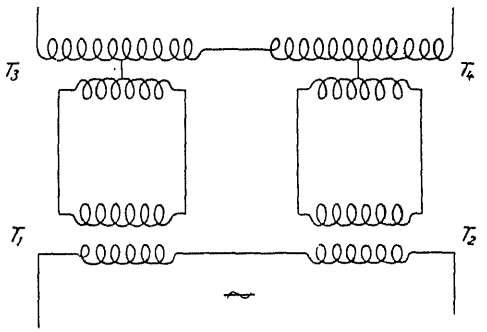


Fig. 79.

ment à $\pm$ 50 kV. par rapport au sol, sont connectés aux circuits isolés intermédiaires. Ce dispositif a, en somme, pour effet de produire artificiellement un secteur d'alimentation dont le potentiel est à $\pm$ 50 kV. par rapport au sol. De cette manière, la plus grande différence de tension existant entre les enroulements des transformateurs T_3 et T_4 n'excède pas 50 kV. alors qu'elle serait le double, et bien plus difficile à réaliser, sans l'étage intermédiaire.

Les premiers transformateurs utilisant ce principe étaient à circuit magnétique ouvert. Ils sont maintenant sans fuites magnétiques afin de rendre la tension secondaire plus indépendante du débit. Il est possible d'obtenir ainsi des tensions atteignant 300 et 400 kV.

Les transformateurs à très haute tension isolés dans l'huile sont surtout difficiles à réaliser à cause de leurs sorties qui présentent alors des dimensions exagérées. Le constructeur suisse E. Haefely, de Bâle, a réussi à en établir donnant 1 million de volts efficaces, dépourvus de bornes et isolés à l'air. Il utilise pour cela des étages de tension et des bobinages unipolaires,

l'une des extrémités étant reliée à la masse. Les carcasses sont isolées par des colonnes d'« heafelite », matière isolante très utilisée dans l'électrotechnique. La figure 80 représente le schéma (1) d'un groupe unipolaire donnant 500 kV. eff.

La figure 2 de la Pl. III montre le contact tournant construit par l'« International X — ray Corporation » pour alimenter de courant redressé au voisinage de 300 kV. max. les tubes Coolidge longs (voir fig. 20) disposés dans la

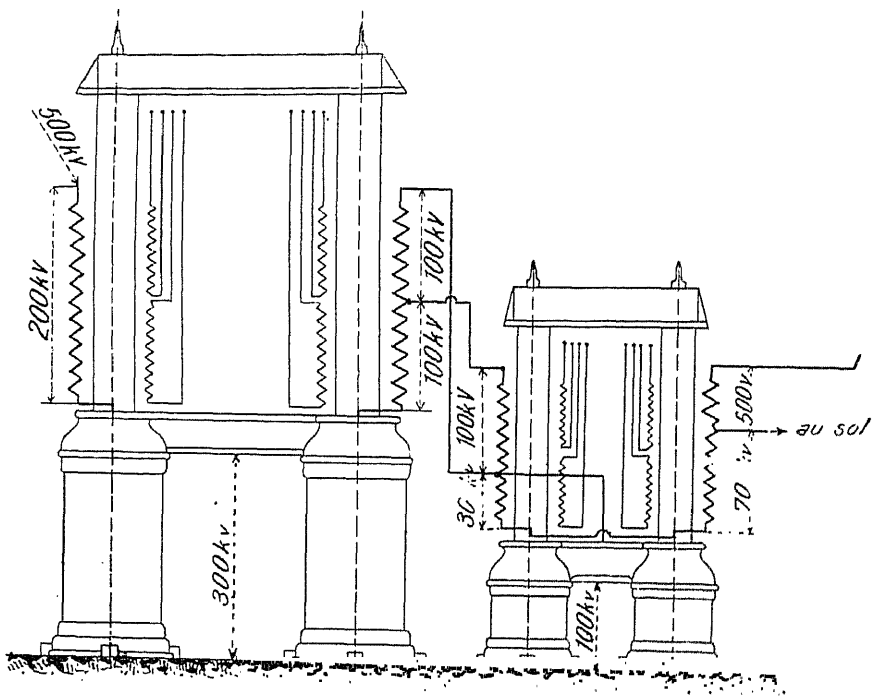


Fig. 80.

cupule représentée sur la figure 49. Il se compose de deux unités isolées du sol et reliées en série, chacune d'elles comprenant un transformateur isolé à l'huile et son redresseur rotatif synchrone. La commutation s'opère entre sphères fixes et segments de tore tournants, afin d'éviter les couronnes, de réduire l'étincelle d'allumage et l'arc d'extinction et de les régulariser. La grandeur angulaire utilisée, trop considérable pour assurer l'homogénéité du faisceau cathodique est exigée par la nécessité d'un débit élevé dans le tube.

Les dispositifs redresseurs statiques ou mécaniques sont indispensables aux tubes à gaz mono-cathodiques et à cathode incandescente dont l'anti-

(1) W. Hess, *Bull. Ass. Suisse d'Electr.*, t. 13, p. 109 (mai 1921).

cathode dissipe l'énergie par rayonnement thermique. Par contre, les tubes à gaz bicathodiques, comme ceux représentés sur les figures 14 et 15 et les tubes à cathode incandescente et à anticathode refroidie, peuvent fonctionner directement sur une onde de tension alternative. Le montage est alors des plus simples : la figure 81 en représente un exemple. Le tube à circulation d'eau T a son anode mise au sol, ce qui en permet le refroidissement par un courant d'eau pris directement sur une distribution urbaine. L'extrémité

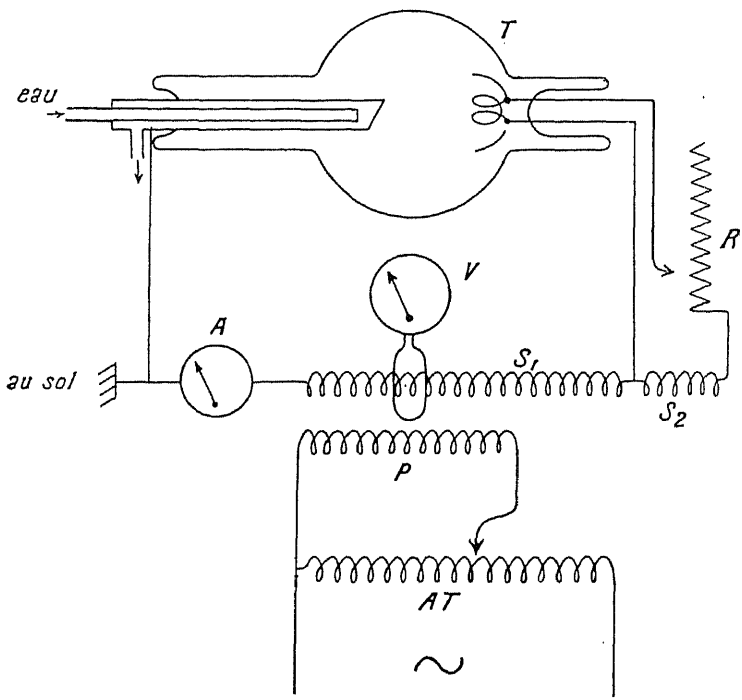


Fig. 81.

isolée du secondaire S_1, porte un enroulement auxiliaire S_2 servant au chauffage du filament. Ce courant est réglé, soit par une bobine de self à fer mobile, soit par une résistance isolée R. Un voltmètre V « au sol » est relié à un enroulement isolé et peut être gradué directement en kilovolts maxima par un étalonnage convenable. Le milliampèremètre A est au sol. Le primaire P est commandé par un autotransformateur AT relié directement au secteur à courant alternatif.

Ce mode de commande doit être préféré dans la majorité des cas à celui qui consiste à disposer en série avec le primaire une résistance réglable. Lorsqu'avec ce dernier montage on veut en effet débiter dans le tube une

plus grande intensité moyenne de courant, on élève la température de la cathode. L'intensité du courant primaire tend elle aussi à croître, par suite de l'induction mutuelle, de même que la différence de potentiel résultant de la chute ohmique dans la résistance de réglage. La force électro-motrice d'alimentation étant constante, la différence de potentiel aux bornes du primaire tend à diminuer, de même que celle existant entre les extrémités du

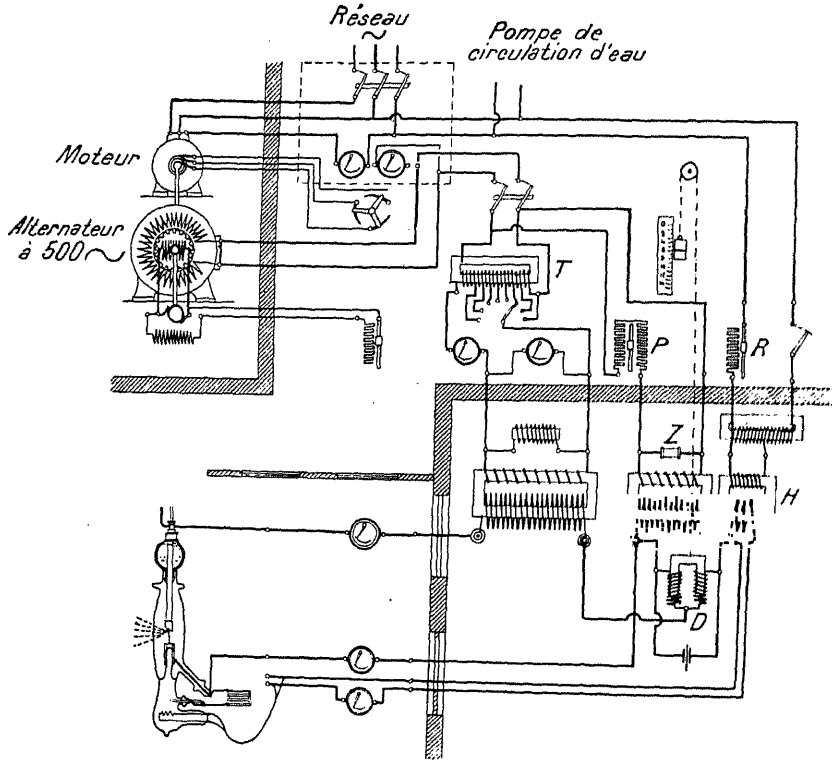


Fig. 82.

secondaire. La différence de potentiel aux bornes du tube n'est donc plus indépendante de l'intensité du courant qui y circule, comme cela a lieu avec la commande par auto-transformateur. De plus, une grande quantité d'énergie est inutilement consommée par effet Joule dans la résistance.

La commande par auto-transformateur a l'inconvénient d'être discontinue, car il est nécessaire de disposer des plots morts entre les différentes sections du bobinage. Il peut en résulter des surtensions. On les évite en intercalant en série avec le primaire une faible résistance, ou une bobine de self, réglables,

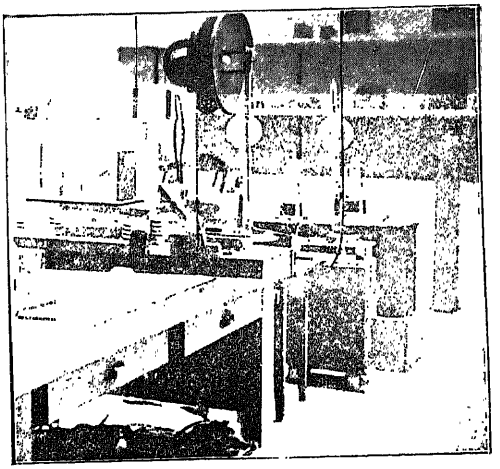


Fig. 1.

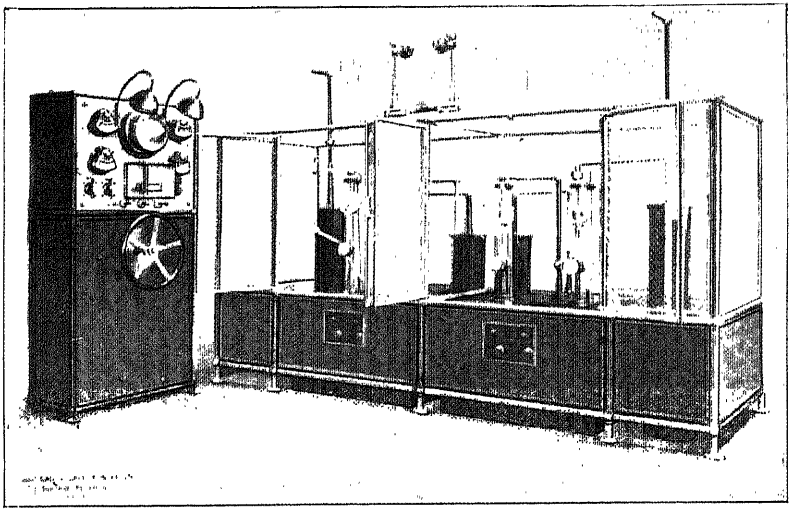
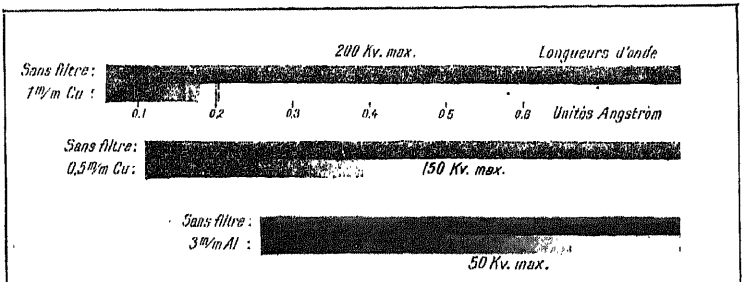


Fig. 2.


200 Kv. max.
Longueurs d'onde
Sans filtre :
1 m/m Cu :
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
Unités Angström
Sans filtre :
0,5 m/m Cu :
150 Kv. max.
Sans filtre :
3 m/m Al :
50 Kv. max.

que l'on court-circuite après fermeture du circuit ou qui sert au réglage précis de la tension secondaire.

Le danger qui résulte de ce mode de commande peut être réduit par l'emploi de fusibles bien calibrés, par la disposition dans le circuit secondaire d'une bobine de self, surtout par l'emploi de conducteurs isolés ou neutralisés par une protection métallique reliée au sol. Ce mode de commande ne convient, bien entendu, qu'aux tubes dans lesquels le courant est indépendant de la tension. Les tubes à gaz exigent une commande par résistance série afin de limiter la puissance dans le cas d'une augmentation accidentelle de la pression, rendant la caractéristique statique décroissante.

La figure 82 représente le montage du tube Lilienfeld sur courant alternatif à 500 périodes, connu sous le nom de « Radio-Silex ». On y voit une application du contrôle de la tension par auto-transformateur (T). Les transformateurs d'allumage (à 500 cycles Z) et de chauffage (à 60 cycles H) sont réunis dans la même cuve. Ils sont contrôlés par des résistances P et R insérées dans leurs primaires. La résistance shunt R_2 de la figure 74 est ici remplacée par la bobine D à self variable.

3. Générateurs à décharge instantanée. — On a construit des générateurs, en vue de la radiographie instantanée, capables de débiter en une seule décharge une grande quantité d'énergie dans le tube. Destot [1] a cherché à obtenir ce résultat en déchargeant dans un tube à gaz un condensateur d'une capacité de 0,01 microfarad chargé au potentiel de 160 kV. par le contact tournant de Delon. Le résultat fut négatif, la décharge produisant seulement une intense lumière blanche dans l'ampoule sans provoquer l'émission d'un rayonnement Röntgen autre que celui juste nécessaire pour radiographier une main. Il est probable que cette décharge n'était pas autre chose qu'une étincelle du genre de celles de Wood.

On arrive à des résultats satisfaisants au moyen de bobines d'induction énormes dans lesquelles on fait passer une très grande intensité momentanée de courant en produisant une rupture extrêmement brusque. On connaît l'expérience de Lord Rayleigh qui consiste à produire une telle rupture en sectionnant le circuit par une balle de fusil. Dessauer [2] court-circuite le secteur à courant continu sur le primaire en y introduisant un fusible très fin qui explose brusquement. Une capacité est disposée en dérivation sur le fusible. Reiniger, Gebbert et Schall [3] emploient un interrupteur à mercure dans l'huile commandé mécaniquement. L'appareil, construit par

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 309 (1909).
(2) *Blitz Apparat.*
(3) *Brevet français*, n° 432.861 (oct. 1910).

Siemens et connu sous le nom d' « Unipuls », se compose d'un gros transformateur à circuit magnétique fermé, de rapport de transformation égal à 75. Le déclenchement d'un contact mobile rappelé par un ressort court-circuite progressivement, à travers une résistance décroissante, le primaire (0.8 ohm) sur le secteur à courant continu à 220 volts. Il se produit, en fin de course, une rupture brusque dans l'huile. Un condensateur d'une dizaine de microfarads est disposé aux bornes du primaire. Cette rupture est aussitôt suivie par la mise en opposition automatique, dans le circuit, d'une partie de l'enroulement primaire qui est traversée par le courant du secteur à travers la résistance. L'onde de tension induite neutralise la seconde alternance inverse produite par la décharge, si bien qu'au total, le tube n'est soumis qu'à une impulsion unique de grande amplitude.

Il est nécessaire, pour obtenir un bon cliché avec cet appareil, d'employer un tube à gaz « dur ». Le débit instantané est de l'ordre de l'ampère sous une tension pouvant atteindre 100 kV. La durée d'émission des rayons Röntgen, directement enregistrée au moyen d'un diaphragme rotatif, nous a paru voisine d'un vingtième de seconde avec un maximum assez net. Ce dispositif est utilisé pour la radiographie du cœur dont le mouvement est rapide. Quelques radiologistes effectuent tous leurs clichés par le procédé de la décharge unique.

4. Générateurs à tension constante. — Les générateurs à tension constante ont été assez employés autrefois sous forme de machines électrostatiques mais, malgré les nombreux perfectionnements reçus par ces appareils, les débits possibles demeuraient de l'ordre du milliampère. Hulst aurait cependant construit une machine à 50 petits plateaux horizontaux de mica permettant un débit d'une vingtaine de milliampères.

Villard et Abraham [1] ont réalisé une machine à vingt plateaux d'ébonite, de 70 cm. de diamètre, tournant à la vitesse de 1.200 tours par minute, dont le débit maximum était de 3 milliampères à bas voltage, de 1 m.A à 210 kV. et la tension maxima de 320 kV. La fragilité et l'inconstance de ces appareils ne pouvaient cependant en faire des générateurs puissants.

Il n'est pas non plus certain que les machines à diélectrique tournant donnent toujours une tension constante. F. J. Harlow et F. J. Evans [2] ont en effet récemment montré, par des mesures d'absorption et des expériences directes, que la décharge d'une machine Wimshurst dans un tube Coolidge était périodique et de basse fréquence, si bien que le rayonnement

(1) *C. R.*, t. 152, p. 1813 (1911).
(2) *Phys. Soc.* et *Röndg. Soc. A discussion on X-Ray measurements*, p. 90 (févr. 1923).

était aussi hétérogène que dans le cas d'une alimentation sinusoïdale.

Trowbridge (1) a décrit le fonctionnement d'un tube à gaz du genre Chabaud-Villard sur sa batterie d'accumulateurs de 40 kilovolts. L'amorçage était difficile et ne se produisait que lorsque l'anticathode avait été préalablement portée au rouge (sans doute par un fonctionnement préalable sur bobine, ce qui avait pour effet de mollir le tube). Une résistance liquide de 4.10^{11} ohms était disposée dans le circuit afin de limiter le débit à 3 ou 4 milliampères. C'est cette batterie qui, en ces dernières années, a été utilisée par Duane pour découvrir, grâce au tube Coolidge et au spectromètre de Bragg, l'importante relation du quantum dans l'émission des rayons Röntgen.

La machine rhéostatique de Planté, combinée avec des batteries d'une importance plus modeste, ne semble pas avoir été utilisée pour la production des rayons X. Elle a l'inconvénient de donner une tension intermittente.

Des dynamos à haute tension ont été construites, en particulier par Thury (2), qui a réussi à établir une machine donnant 25 kV. Les bobines induites et le collecteur étaient fixes, l'inducteur et les balais mobiles. La différence de potentiel entre chacune des lames atteignait 500 volts si bien que la commutation devait s'effectuer sous soufflage d'air. Avec une excitation de 8 ampères la machine donnait 25 kV. à 600 tours. Elle pouvait débiter 1 ampère. Des dynamos de ce type, bien isolées, ont été disposées en série pour produire des tensions de l'ordre de 100 kV. pour l'essai de câbles et de canalisations. Elles n'ont pas, à notre connaissance, été utilisées dans la technique radiologique.

Le premier générateur puissant à tension constante ayant servi à la production des rayons X a été réalisé par Delon (3). Il se compose (voir fig. 83) d'un transformateur unipolaire de 100 kV. à circuit magnétique fermé, isolé dans l'huile, dont l'extrémité isolée du secondaire S est successivement reliée, par le contact-tournant synchrone T, aux condensateurs unipolaires C_1 et C_2 de 0,011 microfarad. Le contact-tournant est entraîné, par un moteur synchrone, à une vitesse angulaire égale à la moitié de la pulsation, si bien que ces condensateurs, chargés isolément au potentiel de crête par chacune des alternances, donnent une tension constante double utilisée par le tube. La continuité de la tension est proportionnelle à la fréquence de la charge, à la capacité des condensateurs, à la tension, et est inversement pro-

(1) *Phil. Mag.* (1900).
(2) *Electricien* (mai 1901).
(3) *Arch. Electr. Méd.* (sept. 1908) et p. 475 (juin 1909).

portionnelle au débit. Elle peut pratiquement être réalisée à quelques centièmes près.

Cet appareil extrêmement robuste pouvait fournir 40 milliampères sous 250 kV. mais les tubes à gaz utilisés à cette époque étaient loin de pouvoir absorber cette puissance. Une forte résistance liquide R ou une bobine de

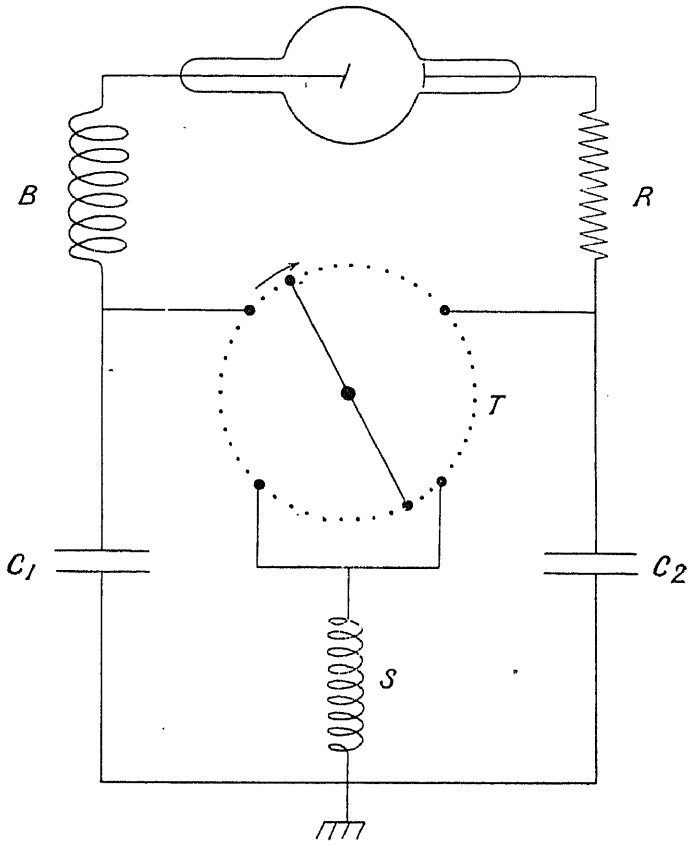


Fig. 83.

self B devait être intercalée dans le circuit de l'ampoule au cas d'un mollissement accidentel. Ce dispositif n'eut guère de succès par suite du mauvais fonctionnement des tubes à gaz sous tension constante et fut modifié comme l'indique la figure 78. Il aurait, au contraire, pris une grande importance si le tube Coolidge avait été connu à cette époque.

On peut aussi construire un contact-tournant donnant une tension constante, sans l'aide d'aucun condensateur, en redressant une tension

alternative polyphasée. Cabot (1) aurait ainsi réalisé un redresseur rotatif dans lequel la commutation d'un système 9—phasé produisait une tension dont les fluctuations ne dépassaient pas 1 à 2 %, pour une tension de 100 kV. et une puissance de 15 kw.

Cependant les redresseurs statiques sont d'un bien plus grand attrait et tous les systèmes de soupapes que nous avons étudiés peuvent servir, du

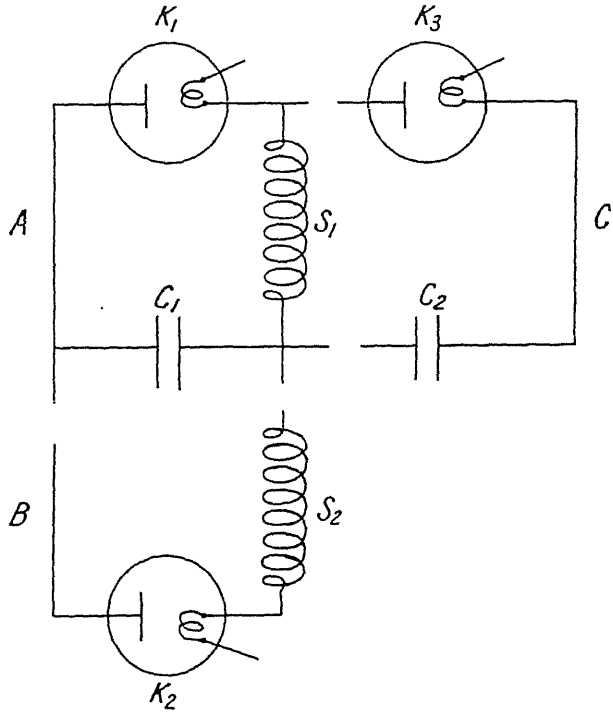


Fig. 84.

moins théoriquement, à entretenir la charge d'un condensateur faisant office de réservoir en atténuant les fluctuations de tension. Aussi a-t-on cherché à remplacer le contact-tournant par des soupapes cathodiques et Villard (2) a décrit un montage simple (voy. fig. 84, A) consistant à charger un condensateur par une bobine ou un transformateur statique S_1, à travers une soupape K_1 de son modèle. La soupape laisse passer l'alternance chargeant le condensateur C_1, à la tension de crête et s'oppose à la décharge du

(1) Cité par KAYE, *X Rays*, p. 65.
(2) *Les Rayons cathodiques*, p. 7 (1907).

condensateur pendant l'alternance inverse. Ce procédé a été utilisé et préconisé dès 1915 par R. Ledoux-Lebard et l'auteur (1) pour l'alimentation des tubes à rayons X et particulièrement des tubes Coolidge. C'est grâce à ce montage que les oscillogrammes et les spectres des figures précédentes ont été obtenus, les soupapes cathodiques étant remplacées par des kénotrons.

Il existe plusieurs variantes du montage de Villard, permettant l'utilisation des deux alternances. L'une, consiste à utiliser quatre soupapes disposées en pont de Wheastone ; une autre à doubler le secondaire et à utiliser alternativement chaque moitié pour charger un seul condensateur, une soupape étant intercalée dans chacun des deux circuits. Ce montage (voy. fig. 84, A et B) donne une tension polarisée positive ou négative, suivant la disposition des soupapes, le point milieu du secondaire étant au sol. C'est celui que nous utilisons au Laboratoire de Recherches Physiques sur les Rayons X pour alimenter le tube représenté sur la figure 39. A cet effet, le transformateur bipolaire symétrique est alimenté par du courant à 600 périodes. Chaque alternance traverse un kénotron résistant à 150 k V. eff. inverses et entretient la charge d'une batterie de quatre condensateurs à diélectrique de verre noyé dans l'huile, d'une capacité totale voisine de 0,1 microfarad et supportant 50 kV. Les cathodes des kénotrons sont chauffées par des transformateurs fonctionnant sur le réseau à 50 périodes. Le courant à 600 périodes est fourni par un groupe convertisseur monobloc, employé en radiotechnique, consistant en un moteur à courant continu entraînant un alternateur à fer tournant, l'inducteur et l'induit étant fixes. L'induit est relié directement au primaire du transformateur et la tension est commandée par une résistance disposée en série avec l'enroulement inducteur. La machine fonctionne ainsi à puissance constante, ce qui est un avantage précieux pour l'alimentation d'un tube relié à une pompe. Les condensateurs étant chargés 1.200 fois par seconde, la valeur limite de la chute de tension, pour un débit de 30 milliampères, ne dépasse pas 250 volts, soit 5/1.000 à 50 kV., et est certainement bien plus faible par suite de la durée notable de la crête et de son aplatissement. Cet ensemble est représenté sur la figure 1 de la Pl. IV. Sa puissance est de 3 kW.

Hull (2) a décrit un appareillage de principe analogue. Le courant d'alimentation à 2.000 périodes était produit par le dynamoteur d'Alexanderson, dans lequel le même champ magnétique est utilisé pour le moteur et l'alternateur. Le transformatenr était à fuites magnétiques et le pri-

(1) A. D., *Brevet français*, n° 78.659 (août 1915) et R. Ledoux-Lebard et A. Dauvillier, *C. R.*, t. 152, p. 405 (mars 1916).
(2) *Gen. Electr. Rev.*, t. 19, p. 173 (mars 1916).

maire shunté par une forte capacité variable servant au réglage de la tension secondaire. Le condensateur à haute tension était formé par la disposition en série de dix éléments à diélectrique de papier paraffiné supportant 10 kV., pourvus chacun d'une résistance en série et d'un limiteur de tension à couronnes. Les fluctuations de la tension étaient étouffées par un système amortisseur formé d'inductances d'une centaine d'henrys, intercalées entre deux condensateurs, dont la capacité pouvait, par cette disposition, être réduite à 0,002 microfarad. La puissance utilisable était de

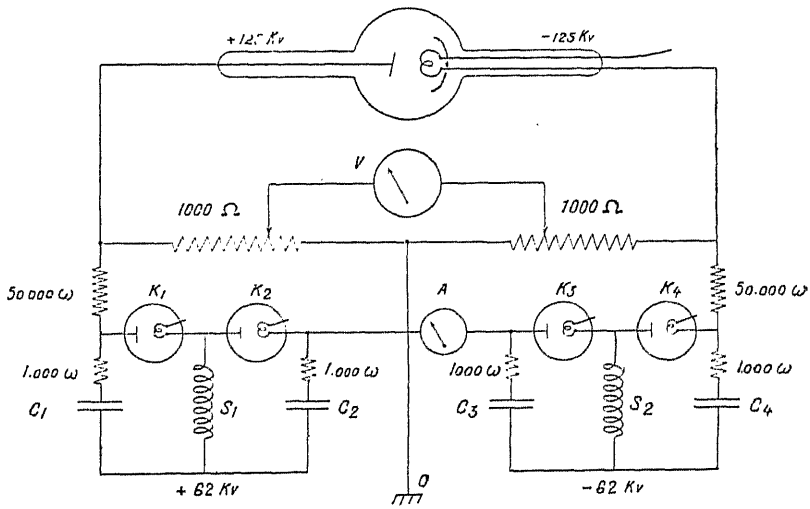


Fig. 85.

5 kW., la tension de 50 kV. en utilisant les deux alternances ou de 100 kV. avec une seule alternance.

On peut enfin utiliser les deux alternances tout en doublant la tension de crête, grâce au montage de Delon, en remplaçant le contact-tournant de la figure 83 par deux soupapes (voir fig. 84, A et C). La figure 85 illustre le montage ainsi réalisé par les Établissements Gaiffe-Gallot et Pilon pour obtenir une tension, constante de 250 kV. en groupant en série deux unités de ce genre. A ces tensions, on peut utiliser un courant de charge de la fréquence habituelle des secteurs, car les débits demeurent faibles et les fluctuations ont une moindre importance relative. Aussi cet appareillage fonctionne-t-il sous 40 ou 60 périodes. Les deux transformateurs S_1 et S_2 montés en série peuvent fournir chacun 75 kV. max. Ils chargent, par l'intermédiaire des kénotrons K_1, K_2, K_3, K_4, construits pour supporter 150 kV. max. inverses, les condensateurs C_1, C_2, C_3, C_4 de 0,018 micro-

farad. Ceux-ci sont des condensateurs unipolaires de Delon et sont construits comme des câbles. Des résistances de 1.000 ohms sont introduites dans les circuits pour amortir les oscillations. Le point milieu étant au sol, les potentiels des bornes d'utilisation sont symétriques et égaux à $\pm$ 125 kV. L'intensité du courant est mesurée par le milliampèremètre A au sol et la tension l'est par un voltmètre électrostatique V de 5 kV., gradué pour 250 kV., monté sur le dispositif potentiométrique figuré, constitué par des résistances d'alcool-xylol de 1.000 mégohms. La puissance dépensée dans ces résistances est négligeable et le potentiel de l'appareil demeure peu élevé, ce qui permet de le disposer sur un tableau ordinaire de commande. Ce générateur peut débiter une dizaine de milliampères sous 250 kV., les chutes de tension ne dépassant pas 5 %. La commande se fait au moyen d'une bobine de self à noyau de fer mobile disposée dans le primaire. Le réglage est d'une continuité parfaite et la protection électrique est assurée par la présence de cette bobine. L'intensité limite de court-circuit ne pouvant dépasser dans le secondaire une cinquantaine de milliampères.

La figure 2 de la Pl. IV représente cet appareil qui offre le très grand avantage de permettre, dans l'avenir, l'accroissement de sa tension par la simple addition, aux deux groupes actuels, de nouvelles unités d'autant mieux isolées du sol qu'elles seront portées à un potentiel plus élevé. L'appareil alimente un tube Coolidge à anticathode incandescente immergé dans l'huile refroidie contenue dans la cupule de plomb représentée sur la figure 51. Il est utilisé pour la thérapie et la radio-métallographie pénétrantes et constitue incontestablement le générateur radiologique de haute tension le plus parfait construit jusqu'à ce jour.

CHAPITRE VIII

MESURES ÉLECTRIQUES ET DU RAYONNEMENT

La question des mesures est l'une des plus importantes que pose la technique des rayons Röntgen. Il s'agit d'abord de préciser les conditions d'excitation électrique des tubes, de connaître ensuite la qualité des rayons produits, quelquefois leur intensité, toujours — en radiothérapie — la quantité d'énergie absorbée par le milieu irradié.

Nous étudierons successivement ces divers problèmes dans cet ordre.

1. Mesures électriques, — Les facteurs électriques du rayonnement étant l'intensité du courant cathodique et la tension, il semble que, seule, une étude oscillographique de ces deux grandeurs puisse renseigner exactement sur les conditions d'excitation du tube lorsque le générateur fournit, comme le fait l'inducteur, une onde de tension de forme variable et compliquée. Le *contrôle* du fonctionnement peut cependant s'effectuer d'une manière plus simple en ayant recours aux instruments électriques de mesure habituels.

Tension. — La tension est le facteur le plus important à connaître, mais dans le cas d'une onde variable avec le temps, on peut se demander quelle est la grandeur qu'il convient de mesurer. Est-ce la tension maxima (de crête), la tension efficace ou la tension moyenne? Il n'est pas douteux que ce soit la première, car c'est elle qui compte le plus pour l'émission des rayons X. Elle régit en effet, par la relation du quantum, qu'il est commode d'écrire sous la forme

$$V_{max}\,\lambda_0 = 12{,}35 \text{ (kV., Å)},$$

la plus courte longueur d'onde λ_0 du spectre *quelle que soit la loi de variation* de la différence de potentiel. L'intensité globale du rayonnement et la grandeur de l'ordonnée du maximum spectral, sont, en outre, sous tension constante, proportionnels à V^2 si bien que, sous tension variable, c'est la tension de crête qui compte le plus.

Cette grandeur se mesure le plus commodément dans ce cas par la distance explosive. L'introduction dans la technique de l'éclateur à pointes et de la notion « d'étincelle équivalente » par A. Béclère (1) a donc constitué un très grand progrès. Mais, pour que ces mesures soient correctes, il est nécessaire de prendre des précautions que l'emploi de générateurs de grande puissance rendra indispensables. Villard et Abraham (2) ont démontré l'existence de deux sortes de potentiels explosifs statiques ou dynamiques : le potentiel d'aigrette sur courant nul et le potentiel avec gaîne anodique correspondant au passage d'un courant de l'orde du milliampère pour 100 kV. Le premier est le plus faible mais il est irrégulier et ne se manifeste pas dans un gaz parfaitement pur et *sec*. C'est pourtant le seul accessible à la mesure pratique.

Pour les tensions de crête n'excédant pas 70 kV. max. la mesure doit s'effectuer entre des pointes d'aiguilles (N° 00) bien dégagées. Le tableau V (3) indique les potentiels explosifs dans l'air pour une onde sinusoïdale de fréquence courante, à la température de 25° C, sous la pression de 750 mm., pour une humidité de 80 %. Une variation de ce dernier facteur entraîne d'appréciables différences (4).

TABLEAU V

KV. MAX.	DIST. EXPL. CM.	KV. MAX.	DIST. EXPL. CM.
14,14	1,19	49,5	5,1
21,20	1,84	56,5	6,2
28,3	2,54	63,5	7,5
35,4	3,3	70,7	9,0
42,5	4,1		

Pour les tensions supérieures, la distance explosive doit être prise entre des sphères d'autant plus volumineuses que la valeur à mesurer est plus grande. Cette distance variant beaucoup avec la dissymétrie des potentiels, le tableau VI indique la distance d'éclatement, dans les conditions spécifiées ci-dessus, lorsque l'un des pôles est au sol et lorsque les potentiels sont symétriques.

Cette mesure exige en outre une correction relative aux variations de densité de l'air entraînées par celles de la température et de la pression. Le

(1) *Arch. Electr. Méd.*, p. 153 (1900).
(2) *C. R.*, t. 150, p. 1286 (mai 1910) et t. 151, p. 269 (juillet 1910).
(3) *Standardisation Rules of the Am. Inst. Electr. Eng.*
(4) En première approximation on peut admettre que la distance explosive mesurée entre pointes est proportionnelle à la tension de crête en prenant, au-dessus de 100 kV, un décimètre par 50 kV.

TABLEAU VI

Kilovolts maxima	DISTANCE EXPLOSIVE EN CENTIMÈTRES							
	SPHÈRE DE 6,25 CM DE DIAMÈTRE		12,5 CM.		25,0 CM.		50,0 CM.	
	Une sphère au sol	Sphères isolées	Une sphère au sol	Sphères isolées	Une sphère au sol	Sphères isolées	Une sphère au sol	Sphères isolées
14,14	0,42	0,42						
28,3	0,86	0,86						
42,5	1,41	1,41	1,41	1,41				
56,5	1,92	1,92	1,91	1,91				
70,7	2,55	2,50	2,44	2,44				
85,0	3,45	3,20	3.00	3,00	2,9	2,9		
99,0	4,60	3,95	3,6	3,6	3,5	3,5		
113,0	6,20	4,90	4,2	4,2	4,1	4,1	4,1	4,1
127,5		6,05	4,9	4,9	4,6	4,5	4,6	4,5
141,4			5,6	5,5	5,2	5,1	5,2	5,1
170			7,97	7,1	6,4	6,3	6,3	6,2
198			10,8	8,8	7,8	7,7	7,4	7.3
226			15,0	11,0	9,2	9,0	8,5	8,3
254				13,8	10,9	10,6	9,7	9,5
283					12,8	12,3	10,8	10,6
311					15,0	14,1	12,0	11,7
340					17,7	16,0	13,3	13,0
368					21,0	18,0	14,8	14,4
396					25,0	20,3	16,3	15,8
425						23,1	17,7	17,1
452						26,5	19,4	18,7
480							21,4	20,4
509							23,4	22,1
537							25,5	23,9
565							27,6	25,7

(L'éclateur à boules sphériques est plus sensible que l'éclateur à pointes aux variations brusques de la tension et celle-ci doit être mesurée en rapprochant lentement les sphères.)

potentiel diminue lorsque la densité décroît. Lorsque les conditions ne sont pas trop éloignées des valeurs normales (1) on peut prendre comme facteur de correction la densité relative elle-même. Ce facteur est indiqué dans le tableau VII pour les valeurs les plus habituelles de la température et de la pression. Dans les autres cas on le calculera au moyen de la formule :

(1) Densités supérieures à 0,90.

$$d = \frac{0{,}392\ p}{273 + t}$$

p étant la pression en millimètres et t la température en degrés centigrades.

TABLEAU VII

TEMPÉRATURE EN DEGRÉS CENTIGRADES	PRESSION EN MILLIMÈTRES DE MERCURE			
	720	740	760	780
0	1,04	1,06	1,09	1,12
10	1,00	1,02	1,05	1,08
20	0,96	0,99	1 02	1,04
30	0,93	0,96	0,98	1,01

Il est nécessaire, pour effectuer sûrement ces mesures, d'éviter la présence de poussières, de champs électriques perturbateurs avoisinants et de radiations ionisantes, comme celles provenant d'effluves ou d'arcs libres disposés à proximité. Lorsque le générateur est puissant, il faut en outre intercaler dans chacun des circuits de l'éclateur une grande résistance (10^6 ohms pour 100 kV.) dont le type le plus parfait consiste en ces crayons de carborundum employés dans l'électrotechnique comme résistances de parafoudres. Un cylindre de cette substance, ayant par exemple 12 cm. de long et 2 cm. de diamètre, a une résistance de 50.000 ohms et peut absorber momentanément une grande puissance. Cette résistance évite la formation d'un arc et l'altération de la surface des sphères qui en résulterait. Elle prévient aussi la production de surtensions (*surges*).

Lorsque la tension est constante, la distance explosive est notablement plus grande pour des pointes entre 25 et 100 kV. Sa mesure a été faite par Villard et Abraham (1) jusqu'à 300 kV. pour des sphères de différents rayons, des pointes et des plans indéfinis. Avec ce dernier type d'éclateur, ces savants ont observé, au-delà de 2 cm. de longueur d'étincelle, une *loi linéaire limite* de la forme :

$$V = 25{,}9\ l + 5$$

dans laquelle V est exprimé en kilovolts et l en centimètres. Il est à remarquer que les potentiels explosifs statiques sont encore plus sensibles que les potentiels dynamiques aux dissymétries de la tension. Pour une tension de 140 kV. et entre des boules de 5 cm. de diamètre, Villard et Abraham

(1) *C. R.*, t. 152, p. 1200 (1911).

ont ainsi trouvé une distance explosive de 8 cm. avec des potentiels symétriques, de 15 cm. lorsque l'anode était au sol, et de 22 cm. lorsque c'était la cathode. Cet exemple montre le peu de sécurité qu'offre cette méthode de mesure.

L'auteur (1) a cherché à déterminer la valeur de ces tables au point de vue du contrôle de l'émission des rayons X. Il a pour cela effectué simultanément la mesure de la distance explosive et celle de la plus courte longueur d'onde émise, les ondes pulsatoires et sinusoïdales étant privées de composantes inverses par l'interposition d'un kénotron. Les mesures ont montré que ces deux formes d'ondes avaient les mêmes potentiels explosifs, que ceux-ci se confondaient avec les valeurs indiquées, pour les tensions alternatives : *au-dessous* de 70 kV. max. et pour les tensions constantes : *au-dessus* de 90 kV. max., aussi bien entre des pointes qu'entre des boules de laiton poli de 50 mm. de diamètre. Cet effet est dû à l'élasticité diélectrique de l'air, le potentiel disruptif étant toujours plus faible lorsque la tension est polarisée que lorsqu'elle est alternative.

Ces résultats sont valables pour un tube à cathode incandescente. Lorsqu'un tube à gaz résistant se trouve dans le circuit, on obtient des valeurs discordantes dès que la tension excède 50 kV. La véritable tension décelée par la plus courte longueur d'onde est toujours plus faible que celle indiquée par l'étincelle équivalente. La cause de cet effet est expliquée par un oscillogrammes des figures 53 et 57. L'amorçage de ces tubes étant les phénomène instable, de contrainte, les diverses éruptions diffèrent beaux coup en amplitude et il en est de même pour les *différences de potentiel* correspondantes. Le tube peut aussi présenter des ratés, c'est-à-dire ne pas s'amorcer. La force électromotrice possède alors sa valeur maxima seule décelée par le spintermètre. L'éclateur n'est donc sûr que lorsque le tube fonctionne toujours de la même manière, partant lorsqu'il possède une cathode incandescente. Encore faut-il qu'il ne soit pas soumis à une force électromotrice alternative, comme c'est le cas pour le montage de la figure 81. La tension inverse inutilisée est alors toujours supérieure à la tension directe, si bien que la distance d'éclatement donnerait une mesure erronée, entachée d'une erreur par excès. Il est nécessaire, dans ce cas, d'insérer un kénotron dans le circuit pour pouvoir mesurer la tension de crête utilisée.

L'éclateur a l'inconvénient de ne pas permettre un contrôle permanent de la tension de crête. Or, ce facteur est beaucoup plus important à connaître à tout instant que ne l'est l'intensité, puisqu'il intervient au

(1) *Annales de Physique* (*loc. cit.*).

second degré. Il serait mauvais de contrôler la tension maxima par l'intermédiaire de la tension efficace qui serait indiquée par un voltmètre électrostatique (comme le qualimètre de Bauer) ou une bobine auxiliaire reliée à un voltmètre thermique (comme le scléromètre de Klingelfuss) parce qu'on ignore la relation existant entre ces deux grandeurs, la forme de l'onde étant, comme nous l'avons vu, susceptible de se modifier. Même dans le cas d'une alternance sinusoïdale très régulière livrée par un kénotron, la relation qui existe entre les valeurs maxima et efficace diffère déjà beaucoup du rapport théorique, au-dessus de 10 kV. et d'autant plus que la capacité du circuit est plus grande. L'oscillogramme de la figure 86, qui représente une onde de tension de cette forme, explique cette anomalie : la sinusoïde est déformée et prolongée par l'effet de capacité à tel point que

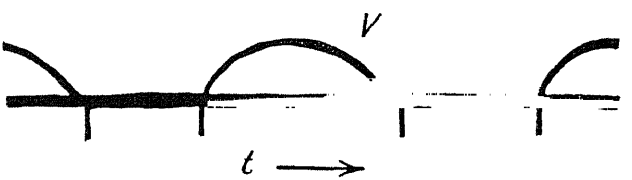


Fig. 86.

la valeur de la tension efficace est fortement exagérée (de 20 % pour 60 kV eff. indiq.).

On a cherché à construire des voltmètres de crête permettant la lecture directe et continue de cette grandeur. Le dispositif de Fleming consiste, comme on le sait, à charger à la valeur de crête un petit condensateur par l'intermédiaire d'un kénotron, un voltmètre électrostatique étant branché sur le condensateur.

Il a aussi été introduit récemment dans l'électrotechnique une méthode de mesure des tensions de crête élevées beaucoup plus sûre et plus précise que celle basée sur les distances explosives et les transformateurs de potentiel. Elle repose sur ce fait que, dans l'air et sur un conducteur cylindrique poli, l'« effet couronne » apparaît pour une tension parfaitement définie, reliée d'une manière simple au diamètre du conducteur et à la pression du gaz. On a construit sur ce principe des « voltmètres à couronne [1] » susceptibles de mesurer les valeurs maxima instantanées d'une tension alternative ou continue de forme quelconque. Des tiges métalliques isolées, polies et interchangeables de divers diamètres sont, à cet effet, introduites suivant

(1) Voir WHITEHEAD, HOPKINS et ISSHIKI, *Bull. Ass. Ing. Electr. Inst. Electr. Montefiore*, t. 1, p. 42 et 81 (1922).

l'axe d'un cylindre métallique relié au sol où la pression du gaz est modifiée jusqu'à l'apparition du phénomène. Celui-ci peut-être décelé visuellement, téléphoniquement ou galvanométriquement. Cet appareil est particulièrement adapté à la mesure des potentiels de plusieurs centaines de kilovolts.

La mesure directe de la tension maxima existant aux bornes du tube est aussi souvent remplacée par une mesure effectuée sur l'un des enroulements du transformateur lorsque celui-ci est à circuit magnétique fermé. Si le rapport de transformation est connu, il est possible de graduer directement en kilovolts un voltmètre disposé aux bornes du primaire.

Ce rapport varie cependant tellement avec la charge du circuit secondaire que cette méthode ne saurait fournir qu'une approximation assez grossière. Le rapport de transformation est, en effet, affecté par les chutes ohmiques dans les enroulements, les fuites magnétiques, la perméabilité du fer et les courants de fuite et de capacité par rapport au sol. Coolidge propose cependant ce mode de mesure en ayant soin toutefois d'avoir recours à une courbe d'étalonnage pour chaque débit secondaire.

Une bonne solution consiste à brancher un voltmètre électrostatique de quelques kilovolts sur une fraction connue de l'enroulement secondaire, par exemple un vingtième, en ayant soin de mettre au sol l'un de ses pôles qui sera relié avec une extrémité ou avec le point milieu de l'enroulement.

Lorsque la tension est constante, la meilleure manière de la mesurer est de faire usage de l'excellent voltmètre électrostatique d'Abraham et Villard (1) qui permet une lecture directe jusqu'à 300 kV. Cet appareil peut être utilisé comme voltmètre unipolaire : il mesure alors la tension par rapport au sol, ou comme voltmètre bipolaire : il indique alors la différence de potentiel aux bornes du tube. Il se compose (voir fig. 87) d'un piston B à suspension bifilaire D, équilibré par la pesanteur, soumis à l'attraction d'un plateau A dont on peut faire varier la distance pour modifier la sensibilité. L'axe C du piston entraîne une aiguille E se déplaçant sur un cadran. Un amortisseur à air F rend l'appareil apériodique. Le mécanisme est enfermé dans un boîtier métallique M anti-couronnes et le piston est protégé par un large anneau de garde G, produisant avec A un champ uniforme. Les deux pôles sont montés sur de hautes colonnes isolantes H. Des repères fixés sur la tige K (ou sur la plate-forme J) permettent d'obtenir, pour toute l'échelle du cadran, les sensibilités 0-25, 0-50, 0-100, 0-200 kV, etc.

L'appareil se démonte facilement et est transportable. Il est assez robuste pour permettre dans l'électrotechnique des essais de câble sur le

(1) *C. R.*, t. 152, p. 1134 (1911).

terrain. Sa précision atteint 1 à 2 %. Comme tous les appareils indiquant des valeurs *efficaces*, la loi de son échelle est parabolique. Il a enfin le grand avantage de ne pas consommer d'énergie.

Pour mesurer une tension constante avec une très grande précision, il est nécessaire de construire une grande résistance métallique, soigneusement étalonnée, immergée dans l'huile et d'équilibrer la différence de potentiel, produite par le passage du courant et prise sur un élément de cette

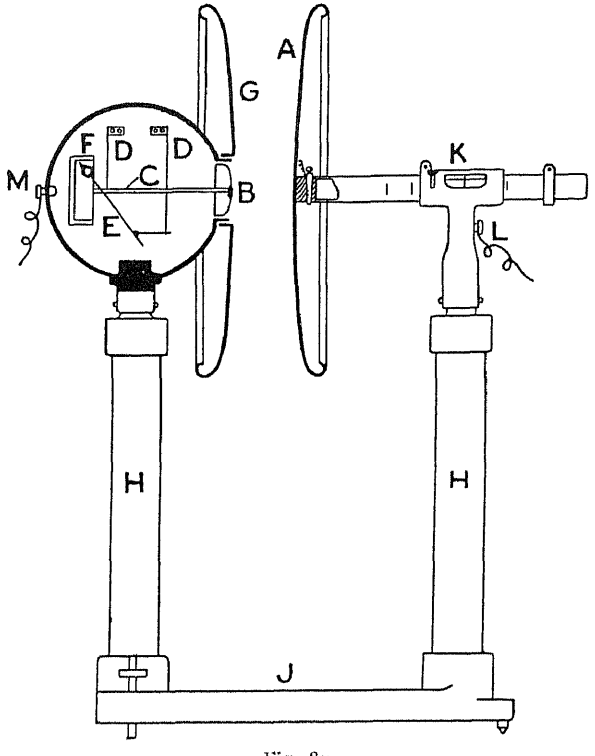


Fig. 87.

résistance, par la *f. e. m.* d'une pile étalon, un galvanomètre sensible étant intercalé dans le circuit comme appareil de zéro. Cette méthode a été utilisée par W. Duane dans ses mesures de *h*. La tension était d'environ 40 kV. et la résistance de 6 mégohms.

Guye [1] a imaginé un électromètre électrostatique unipolaire susceptible d'être utilisé jusqu'à 100 kV. et fonctionnant dans une atmosphère d'anhydride carbonique sous pression (8 atm.). L'appareil est calibré au moyen d'un électromètre absolu. Il est peu encombrant et susceptible

(1) *Arch. Sc. Phys. et Nat.* (1913).

d'une grande précision. Des condensateurs de 2.10^{-3} microfarads pour 40 kV. ont aussi été construits suivant la même technique (1). Ils fonctionnent sous une pression de 25 atmosphères.

Le procédé qui consiste à disposer en série un micro-ampèremètre avec une grande résistance formée de carbone, de carborundum, d'eau distillée, d'alcool pur ou additionné de xylol, etc., n'est pas satisfaisant, car ces matières possèdent un grand coefficient de température négatif, et la résistance n'est généralement pas constante. On peut s'affranchir des variations de résistance en disposant un voltmètre électrostatique construit pour supporter quelques kilovolts sur une fraction connue de la longueur totale de la résistance, mais il faut encore avoir à sa disposition un moyen de contrôle, un éclateur à boules par exemple, pour pouvoir vérifier la constance de l'étalonnage. Ce procédé est employé avec le montage de la figure 85.

Intensité. — Comme dans le cas des ondes de tension, celles de courant nous offrent trois valeurs mesurables, le maximum d'amplitude ou crête, l'intensité efficace et l'intensité moyenne. La première se mesure à l'oscillographe, la seconde par les appareils thermiques, la troisième par ceux à cadre mobile. Les appareils à fer mobile ne sont pas recommandables. Le meilleur milliampèremètre thermique est celui de Duddell. Il permet la lecture par un appareil à aiguille de courants de l'ordre du milliampère. Les milliampèremètres à cadre mobile sont d'un usage courant. Ils ont été introduits dans la technique radiologique par Gaiffe. Contrairement au précédent, ils ont une échelle linéaire.

La valeur intéressante de l'intensité, au point de vue de l'excitation des rayons X, est la *valeur moyenne* (2), qui est proportionnelle au nombre des électrons transportés par le faisceau cathodique. Dans des conditions invariables de tension, l'intensité de chacune des composantes du spectre de rayons Röntgen est proportionnelle à l'intensité moyenne du courant. Les appareils à cadre mobile indiquent d'une manière précise la moyenne arithmétique des débits instantanés traversant le circuit, comme on peut facilement le vérifier avec un voltamètre. Lorsque le tube est traversé par un courant inverse, l'intensité de celui-ci se retranche de celle du courant direct, car, contrairement aux appareils thermiques ces instruments sont polarisés.

Broca (3) a fait remarquer que la comparaison des intensités moyenne I_m et efficace I_{eff} permet d'évaluer le temps Θ pendant lequel le courant

(1) D'après WIEN, *Ann. der Phys.*, t. 29, p. 679 (1909).

(2) Ce n'est que dans le cas particulier du tube Coolidge alimenté par un inducteur (voir, page 124) que cette règle est en défaut.

(3) *C. R.*, t. 141, p. 271 (1905).

traverse le tube, la fréquence n des ondes de tension étant connue, si l'on admet que l'intensité demeure invariable durant la décharge. On trouve ainsi :

$$\theta = \frac{I_m^2}{I_{eff}^2} \frac{1}{n}$$

en accord avec une mesure photographique directe effectuée au moyen d'un diaphragme tournant.

Les milliampèremètres à cadre mobile sont rendus apériodiques par freinage électromagnétique. Ils peuvent être shuntés et sont généralement munis d'un condensateur en dérivation destiné à laisser passer les oscillations de haute fréquence qui prennent naissance dans le circuit lorsqu'il y jaillit une étincelle. Ces oscillations ne pouvant traverser le cadre mobile, à cause de sa self-induction, développeraient, sans cette protection, des tensions élevées aux bornes de l'enroulement, susceptibles de court-circuiter celui-ci. Un micromètre à étincelles en dérivation constitue aussi une utile protection.

La meilleure disposition du milliampèremètre dans un circuit consiste à l'insérer au point où le secondaire est mis au sol, milieu ou extrémité de l'enroulement. Mais il est encore nécessaire de disposer un second appareil semblable au voisinage immédiat du tube dans un boîtier à l'épreuve des couronnes (1). Le premier appareil sera calibré d'après les indications du second. Il acccuse en général une valeur trop grande d'une quantité de l'ordre du demi-milliampère correspondant aux courants de capacité et de fuite. Il faut, de plus, pour mesurer d'une façon précise l'intensité du courant traversant un tube Coolidge sous une tension déterminée, opérer par différence en mesurant successivement l'intensité du courant lorsque le filament est allumé et éteint.

Enfin lorsqu'un milliampèremètre doit être inséré dans un circuit porté à un potentiel élevé, il est important de connecter l'un de ses pôles avec le boîtier qui doit être métallique et de grand rayon de courbure. Il faut aussi éviter que l'aiguille ne puisse être soumise à une attraction électrostatique de la part d'un conducteur environnant.

Comme le montrent les oscillogrammes du chapitre VI, l'intensité maxima, dans le cas de décharges espacées dans le temps, est considérablement plus grande que l'intensité moyenne. L'intensité efficace est comprise entre ces deux valeurs. Il n'existe aucun rapport fixe entre ces quantités lorsque la forme de l'onde est susceptible de se modifier.

(1) Toutes les canalisations à haute tension doivent d'ailleurs être faites en tubes métalliques de diamètres d'autant plus gros que la tension est plus élevée. Les raccords se font sur des sphères polies.

Fréquence. — Dans le cas d'un inducteur, il est encore nécessaire de maintenir constante la fréquence des interruptions. On y parvient aisément au moyen d'un tachymètre de contrôle.

Puissance. — Cette grandeur, importante à connaître pour assurer la sécurité du fonctionnement, n'est facilement accessible que dans le cas d'un tube fonctionnant sous une tension constante. La puissance dépensée exprimée en watts, est alors simplement égale au produit des kilovolts par les milliampères. Lorsqu'un tube à cathode incandescente fonctionne sous une tension sinusoïdale on peut, en première approximation, admettre que l'intensité possède la même valeur de saturation pendant toute la durée des ondes de tension. La puissance W est alors égale au produit des valeurs efficaces de la tension et de l'intensité. Si les deux alternances sont utilisées, la tension efficace est égale à la tension de crête divisée par $\sqrt{2}$, l'intensité efficace est sensiblement égale à l'intensité moyenne et l'on a :

$$W = V_{eff} I_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} I_m = 0{,}7\ V_{max} I_m$$

Cette relation demeure vraie lorsqu'une alternance sur deux est seulement utilisée ou lorsque les alternances sont raréfiées d'une manière quelconque. On voit en effet que la tension de crête demeure invariable et que seule l'intensité moyenne est inversement proportionnelle au temps perdu. Les valeurs efficaces sont aussi toutes deux proportionnelles aux racines carrées de cette quantité. Lorsqu'il s'agit d'un inducteur, le facteur numérique est indéterminé et variable.

Lorsque le courant ne passe pas pendant toute la durée de l'onde de tension, comme cela a lieu dans un tube à gaz résistant, la puissance ne peut plus se calculer par le produit des valeurs efficaces des deux facteurs électriques. Il s'introduit alors un facteur de puissance inférieur à l'unité qui ne peut plus être déterminé que par l'étude oscillographique de la décharge.

La puissance ainsi calculée n'indique d'ailleurs pas la quantité d'énergie dépensée par seconde *au point d'impact* à cause de la diffusion des rayons cathodiques. Elle est cependant, avec un tube à cathode incandescente, presque intégralement convertie en chaleur dans l'anticathode. Avec un tube à gaz, la partie correspondant à cette diffusion se retrouve dans la paroi. Une autre fraction est en outre dépensée dans la cathode.

2. Mesures du rayonnement Röntgen. — Ces mesures sont de deux sortes : qualitatives et quantitatives. Pour une étude générale de cette question nous renverrons le lecteur à notre ouvrage, *la Physique des rayons X* et

nous nous contenterons ici de décrire l'aspect du problème en nous bornant à indiquer des solutions d'ordre général.

1. MESURES QUALITATIVES. — La qualité du rayonnement était, avant l'avènement de la spectrographie de haute fréquence, déterminée par son coefficient d'absorption dans un élément étalon comme l'aluminium ou par des grandeurs telles que l' « Halbwertschicht » de Christen, déduites de la loi exponentielle d'absorption. Ce mode de qualification est devenu insuffisant lorsqu'on a su produire des radiations de longueurs d'ondes inférieures à 0,1 Å pour lesquelles le coefficient d'absorption devient très faible devant celui de dispersion, ce dernier étant sensiblement indépendant de la longueur d'onde dans ce domaine spectral (1). Aussi est-il devenu indispensable de qualifier dans la technique les rayons Röntgen, de la même manière qu'on le fait en optique pour les rayons lumineux, à savoir par leur longueur d'onde. La relation du quantum offre tout d'abord un moyen très simple, connaissant la tension de crête, de connaître la limite de haute fréquence du rayonnement. Celle de grande longueur d'onde est déterminée par la filtration qu'on lui fait généralement subir avant de l'utiliser. Il faut enfin, autant que possible, indiquer à quelle longueur d'onde correspond le maximum d'énergie dans le domaine spectral plus ou moins étendu ainsi défini. Les lois de l'émission du spectre Röntgen permettent de préciser cette donnée.

Nos trois schémas de la figure 3 de la Pl. IV sont un exemple simple d'application de cette méthode. Ce ne sont pas des spectres obtenus photographiquement, mais la représentation, aussi approchée que possible, de la distribution de l'énergie en fonction de la longueur d'onde, l'opacité étant rendue proportionnelle à l'intensité. Pour chacun d'eux, le spectre supérieur représente le rayonnement tel qu'il sort de la paroi de verre du tube et, le spectre inférieur, celui que l'on obtient après une filtration appropriée, qui varie suivant le domaine spectral. Le schéma inférieur définit ainsi la radiation que l'on obtient sous la tension de crête de 50 k V. avec un filtre d'aluminium de 3 mm. d'épaisseur. La plus courte longueur d'onde est 0,25 Å, la plus grande environ 0,6 Å, le maximum d'énergie est calculé par notre relation (2)

$$\lambda_{max} = 1.3\ \lambda_0 + 0{,}05\ \text{Å}$$

valable sans terme additif pour une tension constante et avec ce terme pour

(1) C'est pour cette raison que le taux expérimental de transmission dans l'eau est lui-même insuffisant pour définir la qualité de rayons de très courtes longueurs d'ondes, car il tend asymptotiquement vers une limite indépendante de la fréquence.

(2) *Ann. de Phys.*, 1920 (*loc. cit.*).

une tension variable. Ce rayonnement est propre au radiodiagnostic ou à la thérapie superficielle.

Le schéma supérieur représente un rayonnement entièrement différent du premier en ce sens qu'il ne possède aucune longueur d'onde en commun avec lui. Il correspond à une tension maxima de 200 kV. et à une filtration effectuée par 1 mm. de cuivre. Le spectre débute à la longueur d'onde 0,06 Å, finit vers 0,25 Å et possède son maximum vers 0,13 Å. C'est un rayonnement propre à la radiothérapie ou à la radiométallographie pénétrantes.

La longueur d'onde du maximum spectral joue un rôle essentiel dans la qualification du rayonnement et l'on pourrait la désigner du nom de *longueur d'onde effective*. Il serait désirable qu'elle puisse être déterminée directement dans la pratique d'une manière simple, car elle varie pour une même longueur d'onde minima — avec l'appareillage employé et la filtration exercée. Nous avons montré (1) que l'on peut utiliser à cet effet le radiochromomètre de Benoist :

On sait que cet instrument est basé sur cette observation de Benoist que l'argent paraît être aradiochroïque, c'est-à-dire d'une transparence indépendante de la qualité des rayons, alors que l'aluminium est, au contraire, très radiochroïque, sa transparence augmentant rapidement lorsque la longueur d'onde diminue. Cette observation erronée — puisque tous les éléments sont « radiochroïques » — était due au fait que Benoist utilisait, pour la mesure de ses « équivalents de transparence », deux rayonnements, l'un, très absorbable (3° B, λ eff = 0.55 Å), l'autre, très pénétrant (8° B, λ eff = 0.30 Å), dont les longueurs d'ondes effectives se plaçaient respectivement, la première dans les bandes d'absorption L de l'argent, la seconde dans sa bande K (limite K : λ = 0.485 Å) en des points ou les coefficients d'absorption L et K ont sensiblement la même valeur. Ce phénomène serait également observable avec un rayonnement monochromatique, mais la transition brusque que l'on observerait alors, en faisant varier la longueur d'onde d'une manière continue, pour la limite d'absorption K de l'argent, était masquée par la très grande hétérogénéité du rayonnement utilisé par Benoist.

Cet instrument ne devient plus guère lisible au-dessus de 8° B, c'est-à-dire que la transparence du disque d'argent central de 0,11 mm. d'épaisseur, ne devient pas notablement plus grande que celle d'une épaiseur d'aluminium supérieure à 8 mm. Ce rayonnement correspond à une tension d'excitation d'environ 80 kV. Mais, si l'on observe l'effet de rayons de

(1) Congrès Av. Sc. (Bordeaux, août 1923).

longueurs d'ondes de plus en plus courtes, on remarque que le sens de parcours du radiochromomètre se *renverse*, si bien qu'avec un rayonnement produit sous 220 kV. max., filtré par 2 mm. de cuivre, le disque d'argent devient aussi transparent que 4 mm. d'aluminium.

Ce phénomène est dû au fait que les coefficients d'absorption sélective K de l'aluminium et de l'argent tendent tous deux vers zéro lorsque la longueur d'onde diminue, celui de l'aluminium disparaissant le premier, alors que leurs coefficients de dispersion conservent une valeur constante et prennent une importance relative de plus en plus grande quoique différente. Cet effet, très important au point de vue de la filtration, avait déjà

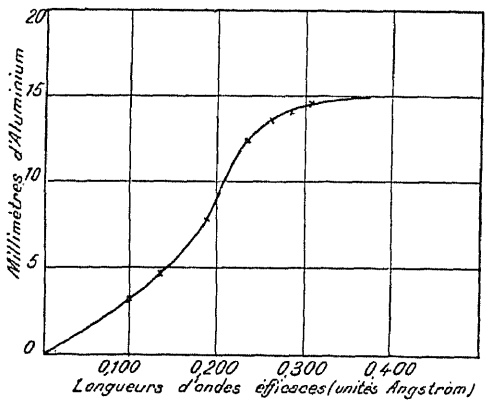


Fig. 88.

été signalé par l'auteur (1) qui a montré spectrométriquement que l'aluminium ne constituait à proprement parler un *filtre* que dans un domaine de longueurs d'ondes supérieures à 0,5 Å. Pour de plus hautes fréquences, l'aluminium ne fait que *disperser* le rayonnement et la *filtration* ne peut être effectuée que par un élément tel que le cuivre, le zinc, l'argent, ou leurs intermédiaires. On peut, en utilisant les coefficients expérimentaux (2) d'*affaiblissement* de l'aluminium et de l'argent pour des radiations monochromatiques, calculer, comme nous l'avons fait, les épaisseurs d'aluminium exerçant le même affaiblissement que le disque d'argent du radiochromomètre, pour les longueurs plus courtes que $\lambda = 0{,}3$ Å. On obtient ainsi une courbe (voir. fig. 88) dont le point d'inflexion ($\lambda = 0.18$ Å) peut être prévu par le calcul. Sa position ne dépend que de la nature de l'élément léger. En graduant directement en longueurs d'ondes, au moyen

(1) *Journ. de Rad. belge* (janvier 1921).
(2) Mesures de Richtmyer, *Phys. Rev.*, t. 17, p. 264 (février 1921).

de signes en plomb, la face plane du radiochromomètre, on obtient un instrument utilisable dans la technique, permettant la lecture directe de la longueur d'onde effective d'un rayonnement complexe filtré produit sous des tensions excédant 90 k V. On peut aussi, pour plus de commodité, déterminer, au moyen d'un dosimètre, l'épaisseur d'aluminium équivalente à 0,11 mm. d'argent.

W. Duane (1) a décrit une méthode analogue dans laquelle l'opacité d'une épaisseur de cuivre de 1 mm. est comparée à une épaisseur variable (de 0 à 30 mm.) d'aluminium, l'étalonnage étant effectué par la comparaison des courbes spectrales obtenues à travers des écrans d'aluminium et de cuivre d'épaisseur constante. En fait, la courbe de la figure 88 coïncide exactement avec celle dressée par Duane suivant ce procédé.

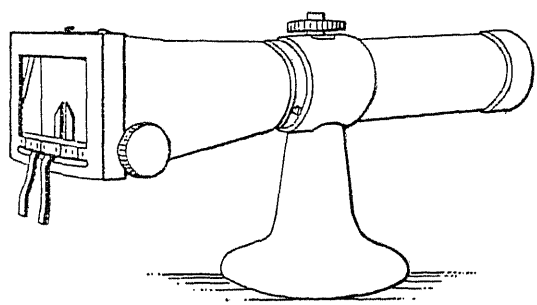


Fig. 89.

On a proposé de remplacer la mesure de la tension de crête par celle, plus directe, de la longueur d'onde minima du spectre. March, Staunig et Fritz (2), ont construit à cet effet un spectrographe du type Seemann qui permet, par examen fluoroscopique, de fixer la limite de haute fréquence. Cet appareil, excellent en principe, ne saurait cependant être d'un usage très pratique car il est à remarquer que, par suite même de la forme de la loi $V_{max}\lambda_0 = \text{constante}$, la précision, qui est très grande pour les faibles tensions, devient illusoire au-dessus d'une centaine de kilovolts, dans le domaine précisément le plus important de la technique. La figure 89 représente le modèle construit par Shall et Son de Londres.

H. MESURES QUANTITATIVES. — Presque tous les phénomènes que l'on observe lorsque les rayons Röntgen sont absorbés par la matière ont été proposés pour la mesure de leur intensité, mais, parmi ceux-ci, un très

(1) *Am. Journ. Röntg*, t. 9, p. 167 (mars 1922).
(2) *Fort. auf dem Geb. der Röntg.*, t. 5, p. 420 (1921).

petit nombre seulement sont suffisamment bien définis pour être susceptible de conduire à des résultats corrects. Les effets thermique, chimiques et lumineux sont dus à des réactions secondaires complexes, telles que des recombinaisons d'ions ou des reconstructions d'édifices cristallins, si bien qu'ils sont trop indirects et non assez physiquement bien connus pour donner lieu à des méthodes de mesure précises. Nous ne retiendrons ici que l'ionisation des gaz comme méthode quantitative le plus à l'abri de la critique et permettant seule une détermination absolue.

Le mécanisme de l'ionisation des gaz a été démontré par C. T. R. Wilson par des expériences célèbres. On sait aujourd'hui que parmi les atomes exposés au rayonnement, un très petit nombre (1 sur 10^{12} environ) semble absorber brusquement un quantum de la radiation incidente que, pour la simplicité de l'exposition, nous supposerons être monochromatique. Si le tube générateur est soumis à une tension de 150 kV. c'est, par exemple, le plus souvent un quantum correspondant à 100 kV. qui sera absorbé. Un électron appartenant à l'atome absorbant, et plus particulièrement un corpuscule K, acquiert l'énergie mesurée par cette différence de potentiel et possède, après son expulsion, une énergie égale à 100 k V. diminuée du travail de sortie qui, si le gaz est assez léger, est de l'ordre de quelques centaines de volts et par conséquent négligeable. Le corpuscule rapide dépense son énergie cinétique en travail d'ionisation en rencontrant les *autres* molécules. Le potentiel d'ionisation *corpusculaire* de celles-ci est une moyenne entre les travaux d'extraction des corpuscules K, L, etc., déterminée par la probalibité que possède chaque sorte d'ionisation de se produire. Pour l'air, ce potentiel moyen est voisin de 33 volts (1). L'électron rapide produirait donc dans ce gaz : $\frac{100.000}{33}$, soit 3.000 paires d'ions, avant d'avoir dissipé toute son énergie le long de son parcours, qui, à la pression atmosphérique, est de l'ordre d'une dizaine de centimètres. De chaque collision résulte une ionisation superficielle ou profonde et le corpuscule plus ou moins rapide libéré est bientôt fixé par une molécule neutre pour donner naissance à un ion négatif, car son libre parcours moyen est très petit sous cette pression. Si le champ électrique dans lequel se trouve le gaz absorbant est assez intense pour assurer le courant de saturation, — c'est-à-dire pour éviter toute recombinaison des ions par suite de l'agitation moléculaire — le courant d'ionisation limite donnera le nombre d'ions produits par centimètre cube du gaz. Si, de plus, le travail d'ionisation est connu, *l'énergie absolue* dépensée par la radiation dans le gaz sera déterminée, car l'ionisa-

(1) Le potentiel d'ionisation superficielle de la *molécule* d'azote est d'une quinzaine de volts et le potentiel d'ionisation K de cet élément, de 395 volts.

tion est un phénomène quantifiable s'opérant sans perte d'énergie et sans effet thermique.

Pour que le potentiel d'ionisation d'un gaz par des électrons soit aussi bien défini que possible, il faut qu'il soit monoatomique, afin de ne pas faire intervenir le travail supplémentaire nécessaire pour ioniser la molécule. Il faut aussi que l'élément soit d'une architecture électronique simple, et par conséquent de petit nombre atomique, pour que le potentiel d'ionisation moyen soit d'une interprétation théorique plus aisée et surtout que l'ionisation ne soit pas la cause d'un rayonnement caractéristique pénétrant qui, s'échappant du gaz absorbant, donnerait lieu à une perte d'énergie. Les gaz rares et tout particulièrement leurs termes moyens : Ne et A semblent donc les meilleurs absorbants utilisables.

Il va de soi qu'on ne saurait songer à absorber complètement des rayons Röntgen pénétrants dans un gaz de ce genre. Il est donc nécessaire pour mesurer *l'intensité* d'un rayonnement monochromatique, de connaître préalablement le coefficient *d'absorption sélective* du gaz pour la longueur d'onde considérée afin de pouvoir calculer, au moyen de la loi exponentielle d'absorption, l'intensité initiale I_0 de la radiation, à partir de la quantité d'énergie absorbée. Mais les éléments légers *dispersent* plus qu'ils *n'absorbent* les rayons de courtes longueurs d'ondes, aussi est-il nécessaire de distinguer ces deux effets.

Le coefficient expérimental *d'affaiblissement* de la radiation dans le gaz, tel qu'il est fourni par la mesure de l'intensité transmise par une masse donnée de gaz — en ayant soin de faire le vide ou de tenir compte de l'air déplacé — n'est pas en effet celui qu'il faut introduire dans l'équation exponentielle, car il est complexe et égal à la somme des coefficients de dispersion et d'absorption sélective σ et τ. Pour séparer ces deux quantités, il est nécessaire de mesurer le coefficient d'affaiblissement pour deux longueurs d'ondes distinctes λ_1 et λ_2. Sachant que l'absorption sélective est proportionnelle à λ^3 alors que la dispersion est à peu près constante — si la longueur d'onde n'est ni trop courte ni trop grande —, il suffit de tracer sur un graphique en fonction de λ^3, la droite représentant les variations de $\sigma + \tau$. Celle-ci coupe l'axe des coefficients pour une ordonnée égale à σ. La variation linéaire de τ en fonction de λ^3 s'obtient alors en faisant passer par l'origine une droite parallèle à la droite expérimentale précédente.

Connaissant τ pour la longueur d'onde considérée, l'intensité de la radiation étudiée, c'est-à-dire l'énergie transportée par seconde par un faisceau ayant l'unité de surface de section, est alors donnée par la relation :

$$I_0 = \frac{W}{1 - e^{\tau dl}}$$

W étant l'énergie absorbée mesurée par le courant d'ionisation, d la densité du gaz et l la longueur de la chambre absorbante.

Cette puissance W, et par suite l'intensité I_0 du faisceau incident, peuvent être exprimées en unités absolues, en ergs par seconde ou en watts, connaissant la grandeur i du courant d'ions exprimé en ampères et le potentiel d'ionisation moyen v exprimé en volts. La charge des ions étant égale à la quantité élémentaire d'électricitée, ou charge de l'électron, le nombre de paires d'ions produites par centimètre cube du gaz est égal à :

$$\frac{i\,c}{10\,e\,s}$$

c, étant la vitesse de la lumière, e la charge de l'électron en unités électrostatiques et s la section du faisceau de rayonnement.

Le travail nécessaire pour produire une paire d'ions est par ailleurs :

$$\frac{v\,e}{300}$$

L'énergie W est alors égale à :

$$W = \frac{i\,c\,v}{3.000\,s} \text{ ergs/sec.}$$

Cette énergie pourrait également être directement évaluée, connaissant la longueur d'onde λ, par la mesure du nombre des trajectoires corpusculaires, observées pendant un temps donné dans le gaz, par la méthode de Wilson (P. Auger).

Ces méthodes deviennent d'une application difficile lorsque la longueur d'onde est très courte. A. H. Compton (1) a montré que la dispersion, qui devient alors le phénomène prépondérant, s'accompagnait d'une dégradation du quantum avec émission électronique et ionisation. Il en résulte que les éléments légers sont plus ionisés que ne l'exigerait la loi de Bragg et Pierce. Le pouvoir ionisant passe, par exemple, par un minimum vers 0,17 Å pour le carbone et croît ensuite indéfiniment lorsque la longueur d'onde décroît. L'action biologique intense des rayons γ pénétrants du radium C ($\lambda = 0{,}020$ Å) s'explique par ces considérations. Pour cette longueur d'onde, l'ionisation due à la dispersion est dix mille fois plus grande que celle due à l'absorption sélective K. Il en résulte aussi que l'irradiation homogène serait un mythe, une radiation monochromatique à l'entrée du corps humain se transformant en un petit spectre continu à l'intérieur.

(1) *Phys. Rev.*, t. 21, p. 484 (mai 1923).

Ces considérations ne s'appliquent, bien entendu, qu'à une radiation monochromatique et ne peuvent être utilisées qu'en spectrométrie des rayons Röntgen. Lorsque le rayonnement est complexe — et c'est toujours le cas en pratique — cette mesure absolue ne peut s'effectuer qu'après son analyse spectrale effectuée par la méthode de Bragg.

La mesure relative de l'intensité peut cependant se faire beaucoup plus simplement. On peut admettre qu'elle est proportionnelle à l'intensité du courant de saturation, lorsque la *qualité* du rayonnement homogène ou complexe ne change pas. Dans le cas contraire, la mesure perd toute valeur, car l'ionisation varie avec la longueur d'onde. Presque toutes les méthodes qui ont été proposées pour mesurer l'intensité des rayons Röntgen (méthode basée sur la variation de conductibilité du sélénium (Luraschi, Fürstenau), méthode fluoroscopique (Guilleminot), méthode photographique (Kienböck), méthodes chimiques (Holzknecht, Sabouraud-Noiré, Bordier, Freund, Galimard, Schwartz, etc.) sont aussi applicables lorsque la qualité demeure invariable, et elles conduisent alors à des résultats exacts, mais dès que le domaine spectral se modifie, elles cessent toutes d'être précises par suite des variations des coefficients d'absorption.

Les mesures d'ionisation exigent encore, pour être correctes, des précautions spéciales. Il est très important que les rayons ne rencontrent, durant leur parcours dans le gaz absorbant, aucun autre corps matériel que ce dernier. Ils ne doivent pas en particulier être susceptibles d'irradier les électrodes ou les parois, car ils donneraient naissance à des rayonnements fluorescents et corpusculaires qui accroîtraient l'ionisation.

Cette recommandation s'applique également aux rayons secondaires prenant naissance sur le trajet des rayons primaires, au rayonnement corpusculaire en particulier, dont le parcours dans un gaz léger à la pression atmosphérique peut atteindre une dizaine de centimètres lorsque les rayons absorbés sont de très courtes longueurs d'ondes. Il faut donc opérer dans une chambre de vastes dimensions, le faisceau étudié doit être très diaphragmé et doit se propager suffisamment loin des électrodes collectrices. Les fenêtres d'entrée et de sortie doivent être aussi transparentes que possible, le mica en feuilles très minces ou la collophane sont recommandables pour cet usage.

On utilise souvent dans la technique, dans le but d'accroître l'intensité des courants d'ionisation, un gaz lourd comme agent absorbant. Mais il ne suffit pas de réaliser une absorption importante pour obtenir un fort courant : il faut surtout choisir un gaz ayant un faible potentiel d'ionisation de manière à produire beaucoup d'ions. L'auteur a observé, par exemple, que de l'acide iodhydrique sous une pression de plusieurs atmosphères donnait lieu à un plus faible courant que des vapeurs d'iodure de méthyle,

sous une pression de quelques dizaines de centimètres de mercure. Ce fait est dû en partie à ce que le travail d'ionisation du premier est plus élevé que celui du second.

Les halogénures de méthyle sont, pour cette raison, fréquemment utilisés et tout particulièrement, le bromure de méthyle qui est gazeux à la température ordinaire. Dans le domaine spectral usuel, ce gaz centuple l'ionisation observée dans l'air à égalité de pression, mais, lorsque la fréquence augmente, ce gain diminue rapidement par suite des fuites par radiations secondaires pénétrantes qui se produisent dans les chambres trop exiguës, les électrons rapides étant susceptibles de produire des ionisations profondes. L'emploi d'un gaz lourd n'est, bien entendu, permis que lorsque ses limites d'absorption n'empiètent pas dans le domaine spectral du rayonnement mesuré.

Ces éthers ont aussi l'inconvénient d'attaquer les matières organiques comme la paraffine, la cire, la picéine et d'être décomposés par les métaux électropositifs comme le magnésium et l'aluminium. D'autre part, il est intéressant de réaliser une chambre étanche, de manière à constituer un étalon immuable d'absorption.

Blake et Duane (1) ont construit une chambre de ce genre qui a été quelque peu perfectionnée par l'auteur. Ce dernier modèle (voir fig. 90) se compose d'un tube cylindrique de verre terminé par des tubulures T_1 et T_2 à larges bords rodés. Les fenêtres transparentes d'entrée et de sortie, constituées de minces feuilles de mica d'épaisseur connue, sont collées sur ces bords au moyen d'un ciment minéral à base d'oxychlorure de magnésium ou d'un silicate alcalin. Ce tube renferme un cylindre métallique formant ressort C qui constitue l'électrode portée à un potentiel élevé, au moyen d'un conducteur D scellé en E dans la tubulure F. L'électrode isolée A est soutenue par une tige de quartz Q à l'intérieur de laquelle est scellé un fil de tunsgtène. Cette tige porte un renflement rodé R sur lequel s'ajuste à sec un tube de fer S à double rodage se montant d'autre part sur le bouchon de verre rodé U. L'étanchéité du joint est assurée par un bain de mercure contenu dans une cuvette portée par le bouchon de quartz. Le tube de fer et le bain sont reliés au sol et constituent un anneau de garde. L'appareil est desséché, rempli de bromure de méthyle et scellé en V_1 et V_2. Il demeure ensuite indéfiniment dans le même état. L'emploi d'un gaz inerte comme le krypton ou le xénon simplifie beaucoup la construction de cet appareil en permettant l'emploi d'un collet de platine, de fenêtres de collophane et d'un bouchon de gel d'acroléine à traversée métallique, mastiqués au moyen de picéine.

(1) *Phys. Rev.*, t. 10, p. 624 (déc. 1917).

Lorsque l'intensité du courant d'ionisation à mesurer est très faible, on emploie une méthode électrométrique. On relie par exemple l'électrode isolée à un électroscope, dont on mesure la charge en un temps donné. Il faut, bien entendu, s'entourer pour cette mesure de toutes les précautions d'usage, en particulier assurer la protection électrostatique. L'appareil précédent doit être disposé dans une enceinte conductrice reliée au sol.

Les électroscopes à feuille mobile sont d'un usage incommode et sont peu

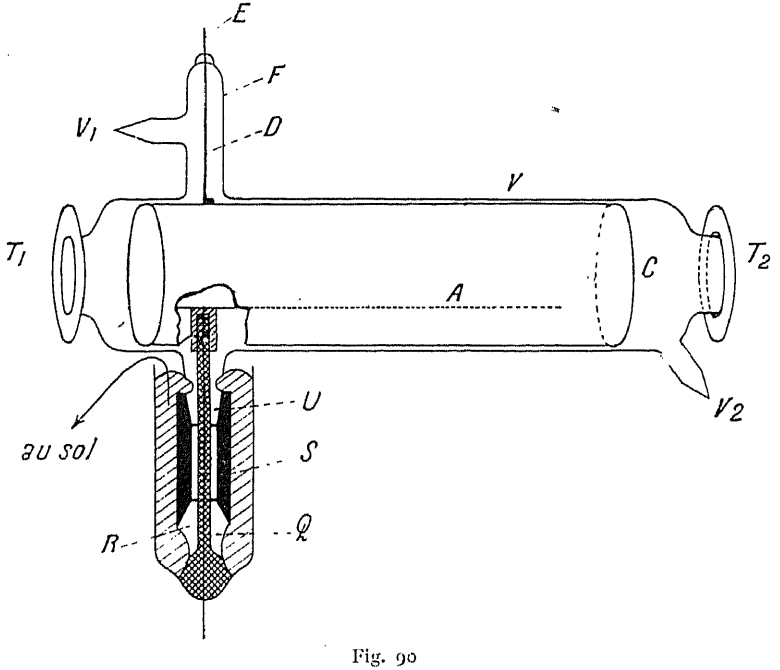


Fig. 90

précis, mais Szilard (1) a construit d'excellents modèles d'électromètres à aiguille d'une sensibilité presque équivalente. Lorsque l'intensité du courant est plus grande, on peut utiliser la méthode du quartz piézo-électrique de P. Curie. Lorsqu'il s'agit de forts courants, on fait simplement usage d'un galvanomètre à cadre mobile. L'un des meilleurs et des plus sensibles est celui de Campbell qui accuse 10^{-10} ampère.

Les mesures quantitatives exigées par les applications médicales des rayons Röntgen sont essentiellement différentes de celles que nous avons envisagées ci-dessus. Il ne s'agit plus alors de déterminer l'*intensité* du rayonnement incident, mais seulement la *quantité d'énergie absorbée par les*

(1) *C. R.*, t. 156, p. 779 (mars 1913) et t. 174, p. 1618 et 1695 (juin 1922).

tissus à une profondeur déterminée. Cette « dosimétrie » des rayons Röntgen pose un problème fort complexe dont la solution est très difficile et dont l'étude sortirait du cadre de cet ouvrage. Disons seulement que l'on remplace (1) le corps du sujet par un volume équivalent d'eau — les tissus absorbant en moyenne comme le fait ce liquide — et que l'on immerge dans ce fantôme une petite chambre d'ionisation exploratrice étanche. Cette chambre est remplie d'air afin de réaliser une absorption comparable à celle des tissus en fonction de la longueur d'onde. Pour faire une mesure absolue, il est en outre nécessaire d'étalonner l'explorateur au moyen d'une chambre dans laquelle l'influence des parois est éliminée. Cette méthode est d'une réalisation correcte difficile et donne généralement des résultats entachés d'une erreur en excès pour la dose profonde. S'il se produit, en dehors de la petite chambre, la moindre ionisation dans l'air environnant le conducteur isolé, sous l'influence de rayons diffus ou transmis, la mesure est erronée. Il est nécessaire d'employer une conduite entièrement rigide entre la chambre et l'électromètre, complètement remplie de paraffine et de soustraire entièrement l'appareil de mesure à tout rayonnement. Sinon, les mesures doivent se faire en mesurant la fuite et en en tenant compte, ce qui est fort délicat. L'auteur (2) est parvenu à réaliser un dispositif qui, tout en s'affranchissant de ces difficultés et de ces causes d'erreur, permet la lecture galvanométrique directe de la quantité d'énergie Röntgen absolue, exprimée en ergs par seconde, qui serait absorbée par l'unité de volume de tissus à l'endroit où se trouve la chambre exploratrice dans le fantôme. Celle-ci est sphérique, à champ radial, et remplie de xénon.

Cette méthode permettra l'évaluation en unités C. G. S. des doses biologiques actuellement exprimées en unités empiriques, dont on pourrait citer une douzaine d'exemples disparates.

(1) Voir KRÖNIG et FRIEDRICH : *Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlentherapie,* 1 vol. 278 p., fig. 63, Urban, éd. (1918).

(2) *Brevet français,* n° 140.585 (fév. 1921) et addition n° 15.713 (mai 1922). Congrès Av. Sc. (Bordeaux, août 1923.) *Rev. Gen. de l'Electr.*, t. 14, p. 887-902 (déc. 1923).

CHAPITRE IX

APPLICATIONS DES RAYONS X

Les applications des rayons X sont de trois ordres : scientifiques, médicales et industrielles. Nous les examinerons très rapidement dans cet ordre.

1. Applications scientifiques (1). — On sait quelle importance a pris la spectrographie des rayons Röntgen à la suite des travaux théoriques de Bohr, de Kossel, de Sommerfeld et de Smekal. La plus grande partie de nos connaissances relatives à la structure électronique de l'atome sont dues à l'étude des rayons X caractéristiques des éléments. Leurs propriétés physiques, magnétiques et chimiques seront certainement expliquées un jour prochain, dans leurs moindres détails, par les enseignements des spectres de basse et de haute fréquence. L'étude de l'absorption et de la dispersion de ces rayons par la matière fournit par ailleurs un moyen d'attaque des problèmes de la nature du rayonnement et de la structure de l'électron.

La spectrographie de haute fréquence fournit de puissantes méthodes d'analyse chimique, par émission et par absorption, applicables aux éléments de nombres atomiques supérieurs à 10. Le premier procédé est beaucoup plus sensible que le second mais il est d'une technique plus complexe et plus délicate. Ces méthodes sont particulièrement précieuses et sûres pour l'analyse des terres rares, des métaux du groupe du platine et des minéraux complexes.

L'analyse de la structure des substances cristallines minérales ou organiques a également pris un très grand essor à la suite des travaux de MM. Bragg, Debye et Hull. La cristallographie, la minéralogie et la chimie organique, utiliseront certainement de plus en plus ces belles méthodes qui semblent même appelées à s'industrialiser.

Wheeler Davey (2) a ainsi décrit un appareil simple (voir fig. 1 de la Pl. V) basé sur la méthode d'analyse des poudres cristallines de Hull, permettant

(1) On se reportera pour cette étude au rapport de M. DE BROGLIE, *Les Rayons X*, appartenant à cette série de *Conférences-Rapports*.

(2) *Gen. Electr. Rev.*, p. 565 (sept. 1922).

l'*analyse chimique* ou le contrôle de la pureté d'un très grand nombre de substances cristallisées. Des graphiques permettent la recherche rapide du système cristallin et la mesure de la distance réticulaire identifie la substance. La figure 2 de la Pl. V représente quelques-uns de ces spectrogrammes caractéristiques, obtenus avec une radiation quasi-monochromatique isolée en filtrant la radiation K du molybdène par un filtre de zircone.

2. Applications médicales. — Les rayons Röntgen sont utilisés en médecine pour deux usages différents : le diagnostic et la thérapeutique. Le premier qui, à l'origine, était confiné à l'examen du squelette et à la recherche des corps étrangers, a pris peu à peu une grande importance. Il est appliqué aujourd'hui en chirurgie dentaire et, en médecine, aux affections pulmonaires, cardiaques, à celles du tube digestif, du rein, de la vessie, etc. Le tube digestif, par exemple, s'examine pendant et après l'ingestion d'un repas opaque à base de carbonate de bismuth ou, mieux, de sulfate de baryum. Les injections gazeuses (pneumo-péritoine) aident à distinguer divers organes abdominaux, etc. Le lavement opaque et l'injection de collargol permettent l'examen de l'intestin et de la vessie, etc. Ces opérations sont facilitées par la prise de radiographies stéréoscopiques et par l'emploi de diaphragmes évitant le voile dû aux rayons dispersés, comme celui de Bücky. Les plaques radiographiques ordinaires tendent à être remplacées par des pellicules, qui se font actuellement de grandes dimensions, et dont les deux faces sont recouvertes d'émulsion (Eastman dupli-tized film, film Pathé ininflammable, etc.). Ces films peuvent être utilisés avec un double écran renforçateur. Les radiographies d'objets épais doivent être faites avec des rayons pénétrants, de l'ordre de 0,15 Å, si l'on veut bénéficier pleinement du renforcement (K) dû à l'écran de tungstate de calcium. Signalons aussi la plaque Impex, dont l'émulsion est recouverte d'un dépôt de cette substance, afin de mieux utiliser le rayonnement ultraviolet de courtes longueurs d'ondes et le rayonnement corpusculaire. Le tungstate de calcium est éliminé avant le développement par immersion dans l'eau chaude.

L'examen des affections osseuses et la recherche des corps étrangers ont pris une très grande importance durant la guerre. De nombreuses méthodes de localisation des corps étrangers ont été proposées et appliquées avec succès. Beaucoup de ceux-ci ont été extraits sous le contrôle radioscopique.

La Röntgenthérapie, d'abord appliquée au traitement des affections de la peau, des teignes, des tumeurs superficielles et à l'épilation, a vu son champ d'application s'accroître énormément lorsque les progrès de la technique

PLANCHE V.

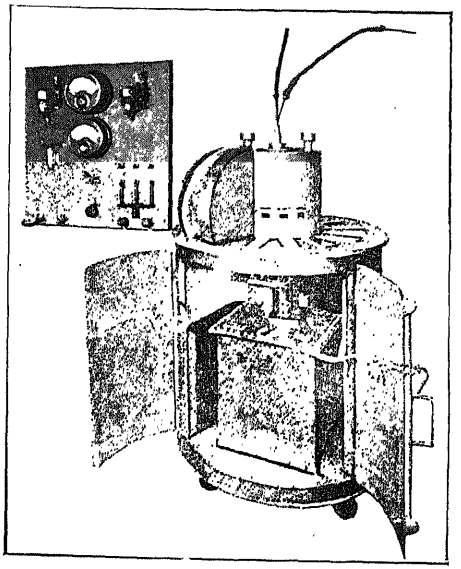


Fig. 1.

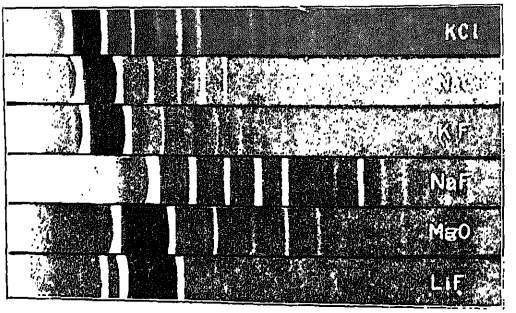


Fig. 2.

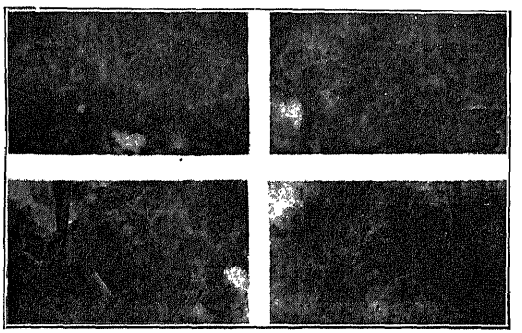


Fig. 3.

ont permis la production de rayons pénétrants qui offrent la faculté de faire absorber à une tumeur profondément située au sein de l'organisme une dose atteignant le tiers ou la moitié de la quantité de rayonnement retenue par la peau. L'irradiation des tumeurs cancéreuses s'opère par la méthode des « feux croisés » en utilisant plusieurs portes d'entrée, dans certains cas concurremment avec l'intervention chirurgicale et la radiumthérapie. Les rayons γ produits par de micro-tubes d'émanation introduits dans les tumeurs et fortement filtrés, ont l'avantage de localiser l'irradiation d'une manière plus parfaite. On peut cependant prévoir que, lorsque les progrès de la technique le permettront, leur usage fera place à celui de rayons Röntgen de très courtes longueurs d'ondes, de l'ordre du centième d'Angström qui, par téléthérapie, permettront des irradiations très homogènes, grâce à *la petitesse de leur coefficient de dispersion et à l'ionisation par dispersion.*

La cinématoradiographie, réalisée par Lhomon et Commandon, apparaît d'une technique très difficile. La photographie instantanée, au moyen d'un appareil cinématographique à objectif de quartz, d'un écran luminescent de tungstate de calcium exige un tube de grande puissance. La physiologie pourrait aussi tirer un plus grand parti de l'utilisation des rayons Röntgen. En dehors de la radiomicrophotographie (Goby) on peut citer, par exemple, l'étude du système circulatoire sur le cadavre par injection intra-vasculaire de liquides opaques et du système respiratoire de l'être vivant par introduction de gaz inertes tels que le krypton et le xénon.

3. Applications industrielles. — Les rayons Röntgen sont, en dehors de la médecine, fort utilisés pour maintes sortes de diagnostics. En matière de fraudes, ils peuvent, en particulier, être d'un grand secours pour l'examen des substances alimentaires ou des produits industriels. Ils servent à la différenciation des pierres précieuses vraies ou fausses, des diamants et des perles par exemple. On les utilise dans certaines pêcheries pour l'examen des huîtres perlières sans ouvrir les coquilles. On les a proposés pour l'expertise des tableaux anciens repeints. Ils peuvent permettre l'examen rapide des colis de valeur dans les bureaux de douane et, en justice, l'examen d'individus soupçonnés de port externe ou interne d'armes ou d'objets précieux. Le bertillonnage s'opère aussi, dans certains cas, par radiographie des doigts frottés d'une poudre opaque.

Les rayons X peuvent être utilisés pour la coloration et la décoration des verres et de la porcelaine et pour l'obtention de pierres précieuses à partir de gemmes incolores, comme certains corindons qui, sous cette influence, peuvent être transformés en rubis ou en topazes. Par contre,

ils ne sauraient servir à la stérilisation de l'eau car ils sont, à ce point de vue, beaucoup moins actifs que les rayons ultra-violets.

Une application importante réside dans l'examen de certains produits manufacturés. Les micas reconstitués, qui servent, en électrotechnique, à l'isolement des lames de collecteur sont couramment radioscopés (1) de manière à faire apparaître les corps étrangers métalliques et les manques d'épaisseur, défauts, qui, tous deux, peuvent avoir les conséquences les plus graves pour la sécurité d'une machine. La figure 3 de la Pl. V montre ainsi la présence de parcelles d'oxyde de fer et d'espaces vides dans des plaques de mica d'environ 1 mm. d'épaisseur.

Les charbons graphitiques, utilisés en électrotechnique sous forme de balais et d'électrodes de fours à arcs, sont parfois soumis à un examen radioscopique qui permet la détection de leurs défauts. Les bois destinés à l'aviation, ainsi que les alliages métalliques légers qui tendent à les remplacer, en sont également l'objet.

La radiométallographie des pièces coulées a pris une très grande importance dès que l'on a su radiographier des lingots épais, comme des cylindres de moteurs à explosion. Certains obus ont pu être examinés de la sorte pendant la guerre. La figure 4 de la Pl. V représente (2) la radiographie d'une plaque d'acier coulé de 15 mm. d'épaisseur. On y voit des sillons clairs qui sont l'indice de soufflures internes, ces cavités ayant dans le cas présent plusieurs millimètres d'épaisseur. La figure 4 de la Pl. I montre aussi la structure interne d'une planche de cuivre commercial et y révèle la présence d'un grand nombre de bulles gazeuses. Cette méthode est encore utilisée aujourd'hui pour l'examen des soudures autogènes qui sont parfois défectueuses, creuses ou poreuses. Elle nécessite un appareillage analogue à celui qui est utilisé pour la radiothérapie profonde et doit s'effectuer à l'aide d'écrans renforçateurs.

Toutes ces applications ont certainement devant elles beaucoup d'avenir. On ne saurait cependant l'affirmer en ce qui concerne l'une des plus importantes d'entre elles à l'heure présente : la radiothérapie des tumeurs cancéreuses, car on peut découvrir un moyen de lutte plus sélectif et moins barbare que celui qui consiste à sacrifier de nombreuses cellules saines pour atteindre les pathologiques. Mais des applications nouvelles, insoupçonnées à l'heure actuelle, peuvent surgir, qui n'attendent pour se révéler que la création de tubes susceptibles de fournir des rayonnements intenses aussi pénétrants que le sont certains rayons γ. Ne pourrait-on pas,

(1) Voir : MOORE, *Gen. Electr. Rev.*, p. 247 (mars 1915).
(2) DAVEY, *Gen. Electr. Rev.*, p. 239 (1915).

par exemple, avec de telles sources, reproduire en grand l'expérience de Wilson et provoquer la pluie artificielle dans certaines conditions météorologiques favorables ? Ne pourrait-on aussi diriger dans l'atmosphère des faisceaux de rayons Röntgen très pénétrants assez intenses pour rendre conductrice une immense colonne d'air ionisé qui, jouant le rôle d'une antenne hertzienne de plusieurs kilomètres de hauteur, aurait une énorme portée? Elle serait invisible de jour, mobile, indestructible et remplacerait les formidables constructions actuelles. De tels faisceaux pourraient aussi devenir des engins de guerre redoutables, par leur pouvoir nocif sur l'homme et leur faculté de court-circuiter à distance les circuits électriques comme ceux des magnétos. Ils serviront peut-être un jour à l'éclairage public en créant dans le ciel d'immenses aurores boréales artificielles dues à la recombinaison des ions. Mais, quoique les possibilités de la science apparaissent infinies, nous abandonnerons pour l'instant ces suggestions à l'imagination d'un Jules Verne ou d'un Wells.

4578

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Introduction 5
Généralités 6

CHAPITRE PREMIER

Cathodes à afflux. 9

1. Théorie de l'émission cathodique. 10
2. Discontinuité de l'émission cathodique. 18
3. Influence de la nature de la cathode. 18
4. Évaporation cathodique 20
5. Refroidissement de la cathode. 23
6. Forme de la cathode. 24
7. Cathodes à chute de potentiel réglable. 25
8. Disparition des gaz pendant la décharge. 26
9. Régulateurs de pression. 28
   Osmo régulateurs 29
   Valves à mercure. 30
   Régulateurs à étincelle 32
   Régulateurs automatiques. 32
10. Choix du gaz. 33
11. Construction des tubes 35
12. Tubes bicathodiques 44
13. Stabilité du fonctionnement. 46

CHAPITRE II

Pages

Cathodes incandescentes 49

1. Cathode de Wehnelt 49
2. Cathode Coolidge 50
   - Tube Standard 50
   - Tube à radiateur 59
   - Tube immergé dans l'huile pour radio-diagnostic 63
   - Tube à circulation d'eau 63
   - Tube métallique 65
   - Autres tubes à cathode incandescente du type Coolidge 66
   - Nature de la cathode incandescente 68
3. Tube métallique Philips 70
4. Le tube Lilienfeld 71
5. Tubes de laboratoire 78
   - Tubes pour la spectrographie de haute fréquence 82
   - Fonctionnement 90

CHAPITRE III

Cathodes pointues 93
Appendice 95

1. Cathode incandescente indéformable 95
2. Enveloppes et isolateurs d'électrodes imperforables 96
3. Procédés régénérateurs du vide 97
4. Anticathodes spéciales 98
   - Anticathodes minces 99
   - Anticathodes massives 100
   - Anticathodes liquides 101
   - Anticathodes gazeuses 102

CHAPITRE IV

Soupapes cathodiques 105

CHAPITRE V

Dispositifs de protection 111

CHAPITRE VI

Forme de la décharge dans les tubes 117

1. Méthodes d'analyse 118
2. Forme de la décharge dans les tubes à gaz 123
3. Forme de la décharge dans les tubes Coolidge 126
4. Dispositifs homogénéisateurs 137
5. Forme de la décharge dans le tube Lilienfeld 139
6. Conclusions 140

CHAPITRE VII

Pages

urs de haute tension 141

›ines d'induction ou inducteurs 141
nsformateurs à courant alternatif 149
ıérateurs à décharge instantanée 155
ıérateurs à tension constante 156

CHAPITRE VIII

électriques et du rayonnement 163

ɜures électriques 163
ˈension 163
ntensité 171
ʳréquence 173
ᵖuissance 173
ɜure du rayonnement Röntgen 173
Mesures qualitatives 174
Mesures quantitatives 177

CHAPITRE IX

tions des rayons X 185

ɔlications scientifiques 185
ɔlications médicales 186
ɔlications industrielles 187

PARIS

IMPRIMERIE " LES PRESSES UNIVERSITAIRES DE FRANCE "